

RENÉ A. ZEPEDA GODOY

Estudo da Precisão dos Receptores Geodésicos  
Doppler Envolvidos no Projeto  
Controle da Rede Geodésica Brasileira  
Usando o Programa Geodopv

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-  
Graduação em Ciências Geodésicas para  
a obtenção do Grau de Mestre em Ciências  
pela Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA  
1987

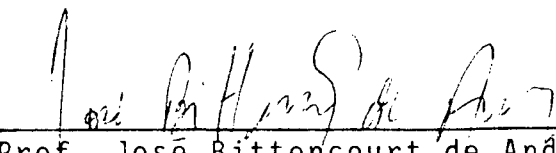
ESTUDO DA PRECISÃO DOS RECEPTORES GEODÉSICOS  
DOPPLER ENVOLVIDOS NO PROJETO  
CONTROLE DA REDE GEODÉSICA BRASILEIRA  
USANDO O PROGRAMA GEODOPV

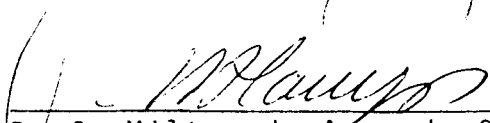
por

RENÉ A. ZEPEDA GODOY

Dissertação aprovada como requisito parcial  
para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências  
no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas  
pela Comissão formada pelos professores.

ORIENTADOR:

  
Prof. José Bittencourt de Andrade

  
Prof. Milton de Azevedo Campos

  
Prof. Camil Gemael

Curitiba, 18 de fevereiro de 1987.

a meus pais e  
os que acreditaram

### **Agradeço:**

- ao Brasil;
- aos meus pais e irmãs;
- ao prof. Camil Gemaël;
- ao meu orientador prof. José Bittencourt de Andrade;
- ao meu amigo prof. Milton de Azevedo Campos;
- à minha companheira Fátima;
- aos meus amigos-colegas de turma (umazinha);
- ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas;
- à CAPES;
- aos meus amigos.

## SUMÁRIO

Titulo . . . . .	i
Termo de aprovação . . . . .	ii
Dedicatória . . . . .	iii
Agradecimentos . . . . .	iv
Lista de tabelas . . . . .	vii
Lista de ilustrações . . . . .	ix
Resumo . . . . .	x
Abstract . . . . .	x
Introdução . . . . .	1
<b>1 DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO . . . . .</b>	<b>3</b>
1.1 O PROJETO . . . . .	3
1.2 A NECESSIDADE . . . . .	4
1.3 DESCRIÇÃO . . . . .	5
1.3.1 O sítio da coleta de dados . . . . .	6
1.3.2 A rede de calibração . . . . .	8
1.3.3 Coleta de dados . . . . .	10
1.3.4 Problemas encontrados . . . . .	11
<b>2 POSICIONAMENTO DOPPLER . . . . .</b>	<b>14</b>
2.1 EFEITO DOPPLER . . . . .	15
2.2 EQUAÇÕES BÁSICAS DO POSICIONAMENTO . . . . .	16
2.3 DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO GEODÉSICA . . . . .	21
2.4 EFEITOS INSTRUMENTAIS . . . . .	23

2.4.1	Erro de centro de fase da antena . . . . .	24
2.4.2	Erro de fase do receptor . . . . .	27
2.4.3	Erro da variação do retardo do receptor. . . . .	27
2.4.4	Erro do oscilador/relógio . . . . .	28
2.5	PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE OBSERVAÇÃO . . . . .	30
<b>3</b>	<b>RECEPTORES GEODESICOS . . . . .</b>	<b>39</b>
3.1	INFORMAÇÃO RECEBIDA . . . . .	39
3.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS . . . . .	41
3.3	RECEPTORES CANADIAN MARCONI CMA-751, CMA-761 . . . . .	45
3.3.1	Tempo . . . . .	46
3.3.2	Contagens Doppler . . . . .	47
3.3.3	Estabilidade do oscilador . . . . .	47
3.4	RECEPTOR JMR-1 . . . . .	48
3.4.1	Tempo . . . . .	49
3.4.2	Contagens Doppler . . . . .	49
3.4.3	Estabilidade do oscilador . . . . .	49
<b>4</b>	<b>PROCESSAMENTO DOS DADOS . . . . .</b>	<b>50</b>
4.1	VOTAÇÃO MAJORITÁRIA . . . . .	51
4.1.1	Votação majoritária de dados do CMA-751. . . . .	51
4.1.2	Votação majoritária de dados do JMR-1. . . . .	52
4.2	SISTEMA DE PROGRAMAS GEODOPV . . . . .	52
4.2.1	Implantação da versão UFPr . . . . .	53
4.2.2	Efemérides precisas . . . . .	53
4.2.3	Descrição geral do programa GEODOPV . . . . .	53
4.3	PROCESSAMENTO COM PROGRAMA GEODOPV . . . . .	57
4.3.1	Opções usadas no programa PREDOP . . . . .	57
4.3.2	Opções usadas no programa GEODOPV . . . . .	58

<b>5 RESULTADOS E ANALISE</b>	. . . . .	.62
5.1 VOLUME DE DADOS	. . . . .	.62
5.1.1 Passagens rastreadas e aceitas no programa PREDOP	. . . . .	.63
5.1.2 Passagens processadas e aceitas no programa GEODOPV	. . . . .	.63
5.2 PRECISÕES ESTIMADAS DOS RECEPTORES	. . . . .	.67
5.2.1 Precisão da variação de distância	. . . . .	.68
5.2.2 Determinação do ruído comum às estações.	. . . . .	.70
5.3 PARÂMETROS DOS RECEPTORES	. . . . .	.71
5.4 PRECISÃO DAS COORDENADAS	. . . . .	.73
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	. . . . .	.81
APÊNDICE	. . . . .	.85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	. . . . .	.90

## LISTA DE TABELAS

1	Receptores envolvidos no projeto . . . . .	6
2	Excentricidades das estações . . . . .	11
3	Períodos de observação para calibração . . . . .	12
4	Características físicas dos receptores . . . . .	44
5	Estatística PREDOP . . . . .	64
6	Estatística GEODOP, efemérides operacionais. . .	65
7	Estatística geodop, efemérides precisas. . . . .	66
8	Precisões dos receptores . . . . .	69
9	Parâmetros finais dos receptores . . . . .	73
10a	Desvios padrões finais em GEODOP, efemérides operacionais . . . . .	75
10b	Desvios padrões finais em GEODOP, efemérides precisas . . . . .	75
11a	Resíduos da redução ao ponto central, efemérides operacionais. . . . .	79
11b	Resíduos da redução ao ponto central, efemérides precisas . . . . .	79



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Emprego do Plano radial de Terra . . . . .	9
2	Rede de calibração . . . . .	10
3	Posições do satélite em relação à estação . . . . .	16
4	Frequência de batimento . . . . .	18
5	Épocas do satélite e da estação . . . . .	18
6	Determinação da posição geodésica . . . . .	22
7	Centro de fase da antena . . . . .	25
8	Contagens Doppler da frequência de batimento . . . . .	31
9	Estrutura lógica da mensagem do satélite . . . . .	40
10	Processamento com efemérides operacionais . . . . .	56
11	Processamento com efemérides precisas . . . . .	56
12	Passagens comuns em GEODOP . . . . .	69
13a	Desvio de frequência receptor C1, CMA-751 S/N 102 . . . . .	86
13b	Desvio de frequência receptor C2, CMA-761 S/N 104 . . . . .	86
13c	Desvio de frequência receptor C3, CMA-751 S/N 106 . . . . .	87
13d	Desvio de frequência receptor C4, CMA-751 S/N 322 . . . . .	88
13e	Desvio de frequência receptor J1, JMR-1 S/N 1213 . . . . .	89
13f	Desvio de frequência receptor J2, JMR-1 S/N 1215 . . . . .	89
13g	Desvio de frequência receptor J3, JMR-1 S/N 1352 . . . . .	89
14a	Solução multiestação, efemérides operacionais . . . . .	76
14b	Solução multiestação, efemérides precisas . . . . .	77

## RESUMO

Como parte do projeto "Controle da rede geodésica brasileira por meio de satélites do sistema NNSS", surgiu a necessidade, de uma fase de calibração dos receptores geodésicos Doppler participantes. Esta dissertação trata da avaliação das diferenças existentes entre estes receptores, valendo-se do sistema de programas GEODOPV, processando os dados com opção de arco curto, usando efemérides operacionais e precisas. Diferenças significativas foram encontradas entre os receptores, dos tipos CMA-751 e JMR-1, a partir da análise da precisão e da relaxação dos parâmetros próprios de cada um deles. As diferenças para o posicionamento relativo (excluindo tendenciosidades que não sejam próprias aos receptores), são da ordem de decímetros.

## ABSTRACT

As part of the Project "Control of the Brazilian Geodetic Network Through the NNSS Satellites", came up the need of calibrating the Doppler receivers. This thesis deals with the evaluation of differences among this receivers, using the sistem computer programs known as GEODOPV, processing the data by short arc option, using on board and precise ephemeris. Significant differences among the receivers CMA-751 and JMR-1, were founded through an analisis of precision and the relaxation of parameters related with each one of the receivers. For relative positioning (excluding bias must related to the receivers), are of order of decimeter.

## INTRODUÇÃO

Em março de 1985, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG) da Universidade Federal do Paraná (UFPr), e através do Programa de Cooperação Técnica Brasil-Alemanha Ocidental, por sugestão do Professor Gunter Seeber da Universidade de Hannover (UH), instituiu-se o projeto "Controle da Rede Geodésica Brasileira, por meio de Satélites do Sistema NNSS". Tal empreendimento contou com o apoio da GTZ (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit), IBGE (Instituto Brasileiro de Cartografia e Estatística), ITC (Instituto de Terra e Cartografia do Paraná), FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e Universidade de Hannover, dando lugar a duas Teses de Doutorado e cinco Dissertações de Mestrado, sendo esta, ora apresentada, a que trata da calibração dos receptores envolvidos no projeto.

Os receptores geodésicos, são sofisticados sistemas eletrônicos de alta precisão, mas com peculiaridades próprias, inerentes ao equipamento.

Quando vários deles, de diferentes tipos, funcionam simultaneamente em translocação, deve-se reservar uma etapa anterior e/ou posterior à campanha de observação, como fase de calibração ou comparação dos receptores participantes.

O objetivo do presente trabalho é determinar a influência dos receptores, na precisão do posicionamento geodésico Doppler. Valendo-se de diferentes estratégias e procedimentos para a redução dos dados, usando o sistema de programas GEODOPV.

Com isto, trata-se de providenciar uma avaliação dos erros sistemáticos, devido à contribuição instrumental, para uma melhor avaliação de alguns parâmetros no controle da rede.

No capítulo I, faz-se uma breve descrição das tarefas realizadas através do desenvolvimento do trabalho. No capítulo II, trata-se uma revisão bibliográfica do posicionamento geodésico Doppler, dando ênfase nos modelos dos efeitos instrumentais. O capítulo III, mostra uma descrição dos receptores geodésicos deste projeto, incluindo as suas características. O capítulo IV, aborda a redução dos dados coletados e processados principalmente, pelo programa GEODOPV. O capítulo V, trata dos resultados obtidos destes dados processados, das precisões estimadas dos receptores, dos parâmetros dos receptores e, uma análise dos mesmos. Finalmente no capítulo VI, faz-se as pertinentes conclusões e recomendações.

## CAPÍTULO I

### 1 DESCRIÇÃO GERAL DO TRABALHO.

#### 1.1 O PROJETO.

O objetivo do projeto é analisar a rede geodésica brasileira, entre os paralelos 25 e 28 graus sul e os meridianos 48 e 52 graus oeste, quanto a escala, orientação, precisão e homogeneidade.

Observou-se em 12 pontos de 1ª. ordem escolhidos pelo IBGE sendo 6 deles em observação simultânea. Numa fase seguinte a determinação de 12 pontos em translocação, para o Projeto de Cadastro Rural do ITC e, a implantação e processamento dos programas ALERT, EGMJV e programas GEODOPV, nos sistemas computacionais HP-1000 e DEC-10 da UFPr.

Os orientadores do projeto foram: Prof.Dr.Gunter Seeber da UH e Prof.Dr.José Bittencourt de Andrade da UFPr, e os coordenadores: Prof.M.Sc. Milton de Azevedo Campos da UFPr e Prof. Dr.Ernst Ulrich Fisher da GTZ.

Durante a visita do Prof. Seeber à UFPr, em abril de 1985, ficou definida a possibilidade da participação de alunos do CPGCG, dando lugar a cinco Dissertações de Mestrado, sendo a escolhida pelo autor a que trata da calibração dos receptores envolvidos no projeto. Em reunião com os orientadores, coordenadores e colaboradores foi estabelecida a forma de participação e tarefas a serem cumpridas.

As operações de campo para a coleta de dados, incluída a calibração, duraram do dia 10 de abril até o dia 01 de junho de 1985.

## 1.2 A NECESSIDADE.

No posicionamento geodésico por meio de satélites do sistema NNSS podem ser usados diferentes tipos de receptores, fabricados por diversas companhias. Todos eles com o propósito de determinar posições geocêntricas ou diferenças de coordenadas entre os instrumentos. São sofisticados sistemas eletrônicos de tecnologia altamente desenvolvida, muito suscetíveis à influência da situação atmosférica, do tratamento indevido, das perturbações no transporte, da variação de temperatura, envelhecimento de seus componentes, etc. De tal modo que não podem ser considerados de comportamento regular ao longo de um período de tempo prolongado. Por isso se recomenda efetuar medições de comparação ou teste, próximo à época de uma campanha importante, como por exemplo, este projeto.

O objetivo de tal comparação ou calibração é determinar a influência dos receptores, na precisão do posicionamento Doppler, que participam do projeto, valendo-se de diferentes estratégias e procedimentos para a redução dos dados, usando o sistema de programas GEODOPV. Trata-se de providenciar uma avaliação dos erros sistemáticos devido à contribuição instrumental - informação prática e direta referente às diferenças sistemáticas, especialmente em altura (ver seção 2.4.1), para melhor avaliação de alguns parâmetros no controle da rede. A necessidade de medições de calibração foi demonstrada por Schenke em 1982 /20/.

A vantagem maior da calibração reside no fato das influências atmosféricas, para estações muito próximas entre si, poderem ser consideradas idênticas a cada passagem de satélite. Com isto os resultados são diretamente comparáveis, restando praticamente sō os erros instrumentais que podem ser perceptíveis no processamento e considerados significativos para a campanha.

### 1.3 DESCRIÇÃO.

O presente trabalho é desenvolvido tentando enfatizar a contribuição do equipamento terrestre no posicionamento. Sendo este, um tema pouco conhecido no âmbito cartográfico, não pretende-se esgotar o assunto, mas sim, ao menos criar uma noção qualitativa da parcela do erro pertencente ao receptor.

A campanha contou com a participação de equipamentos de três companhias fabricantes destes aparelhos, os quais na ordem alfabética são: Canadian Marconi Company (CMA-751 e CMA-761), JMR Instruments Inc. (JMR-1) e Magnavox Advanced Products and Systems Company (MX-1502).

Deve-se esclarecer que as informações obtidas a partir dos dados coletados por estes receptores não tem como propósito determinar se um tipo de aparelho é "melhor" que outro. Entenda-se que as conclusões aqui apresentadas, dizem respeito sō aos receptores específicos tratados. Os receptores participantes são detalhados na tabela 1.

TABELA 1

Receptores envolvidos no projeto.

RECEPTOR	MODELO	serie/núm. (S/N)	S/N antena	ORIGEM
C1	CMA-751	102	206	UH
C2	CMA-761	104	209	UH
C3	CMA-751	106	317	UH
C4	CMA-751	322	263	Min.Aeron.
C5	CMA-751	206	237	UFPr
J1	JMR-1	1213	4876	IBGE
J2	JMR-1	1215	- *	IBGE
J3	JMR-1	1352	4871	IBGE
J4	JMR-1	270	4871	IBGE
M1	MX-1502	676	907	Magnavox

(\*) antena sem placa com número de série

### 1.3.1 O sítio da coleta de dados.

O planejamento para a calibração, prevê um período mínimo de três dias de rastreo simultâneo, por todos os receptores, antes do começo (pré-calibração) e após o fim (pós-calibração) da campanha de observação.

A pré-calibração serviria também, como etapa de treinamento, instrução detalhada das estratégias de observação e programas de trabalho das equipes de campo que participam. O pessoal das equipes da UFPr e ITC não estava familiarizado com o manuseio dos equipamentos.



Para este propósito, deve-se escolher um campo de teste que cumpra com os seguintes requisitos:

- a- um local relativamente seguro, em razão do valor dos equipamentos;
- b- facilidade de acesso para o constante cheque do funcionamento dos aparelhos;
- c- lugar mais ou menos plano e sem obstruções nas proximidades, como construções metálicas ou fontes de água detidas (lagoa, pântano, etc.) -as antenas não podem ter a "visão" obstaculizada perto do horizonte-, Efeitos de caminho múltiplo dos sinais, devido ao metal ou água, são minimizados;
- d- interferências de ondas de rádio na área, devem ser evitadas tanto quanto possível, nas frequências de 400 MHz e 150 MHz ;
- e- controle geodésico disponível nas proximidades da área, para que os resultados (coordenadas) possam ser reduzidos à rede de calibração;
- f- disponibilidade de uma fonte de energia elétrica para assegurar o constante fornecimento de carga às baterias de 12v, no caso de uma eventual falha ou queda de energia.

Estas são as condições básicas para um local ótimo de observações Doppler para calibração; é difícil de atender a todas elas.

O lugar escolhido para estes fins, foi o Observatório Astronômico do CPGCG, localizado no Centro Politécnico da UFPr, que reúne todas as condições mencionadas.

De agora em diante, no decorrer deste trabalho, os receptores JMR-1, CMA-751 e 761 serão mencionados simplesmente como JMRs e CMAs, respectivamente.

### 1.3.2 A rede de calibração.

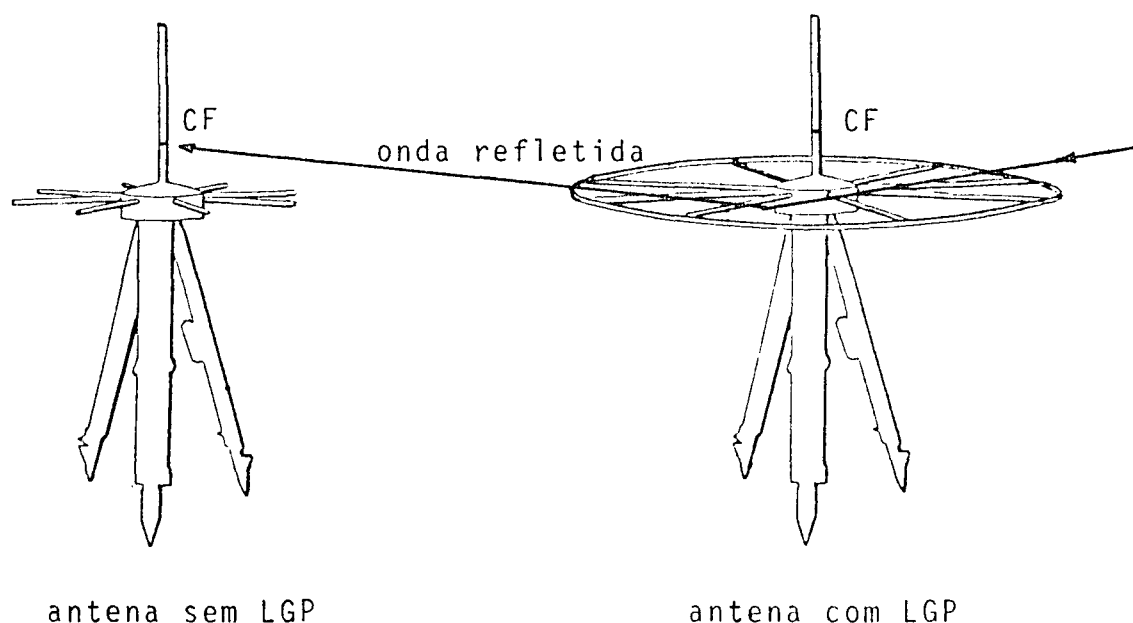
Para a redução dos dados a um só ponto, comum a todas as antenas dos receptores, foi realizada uma rede de calibração na área ao redor do observatório astronômico. Neste local foram colocadas estacas de madeira, suficientemente seguras, de maneira que fossem irremovíveis durante a campanha e, distantes entre si em pelo menos 5 metros. Esta distância foi escolhida para evitar influências mútuas, para distâncias menores (2 a 3 metros), pode-se prejudicar as medições devido aos seguintes fenômenos físicos:

- a- as antenas dos receptores são predominantemente passivas, mas elas emitem ondas eletromagnéticas que resultam de ondas derivadas da amplificação dos sinais recebidos do satélite. Estas ondas são muito débeis, mas de qualquer maneira podem desfavorecer a qualidade dos dados Doppler de estações vizinhas;
- b- empregando o "Plano radial de Terra"(Large ground plane-LGP) nos CMAs, são absorvidas as reflexões do solo, mas também pode refletir sinais para passagens muito baixas, atingindo o centro de fase (CF) da antena vizinha através dos braços do LGP, como mostra a figura 1.

O observatório possui um pilar central com coordenadas astronômicas de 2ª ordem; também são conhecidas suas coordenadas no elipsóide WGS-72, provenientes de uma determinação Doppler realizada por uma turma do Curso de Engenharia Cartográfica. Estes são ótimos valores a serem introduzidos em cada receptor como coordenadas iniciais aproximadas.

FIGURA 1

Emprego do Plano radial de terra (LGP)

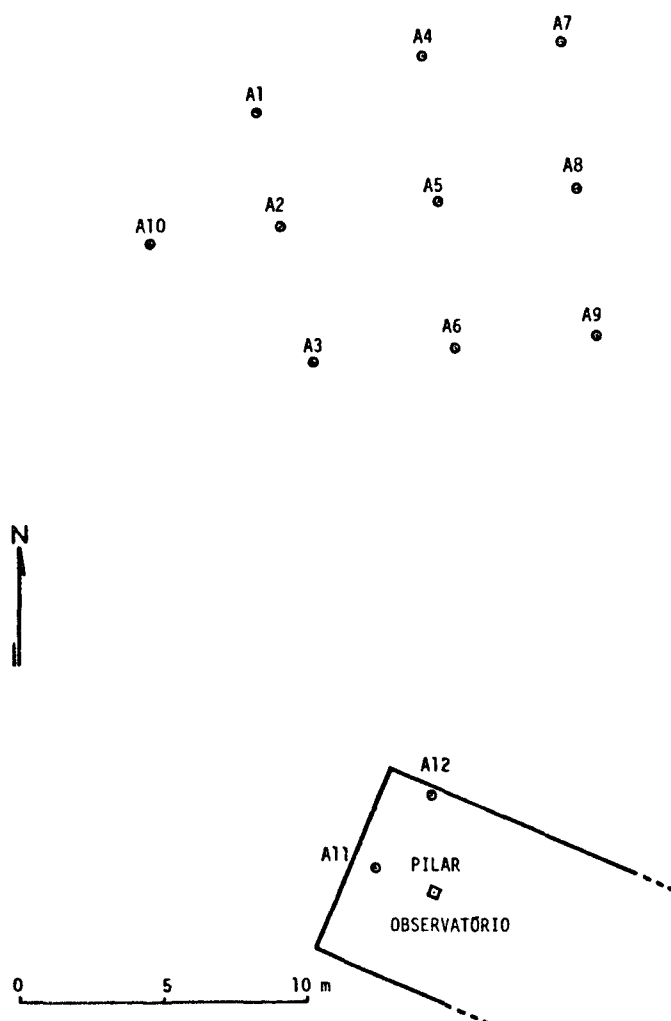


A realização da rede foi possível a partir de um monolito, localizado aproximadamente a 160 metros do observatório. Deste ponto se conhecem as coordenadas e azimuth UTM da linha de ligação da qual foi determinado. Com a utilização de um distanciômetro eletrônico KERN D-500 e um teodolito WILD T2, se realizou a rede de calibração com precisão de 1 a 2 centímetros, sendo que 10 pontos estão no solo da área próxima e 2 pontos no teto do observatório. Estes dois últimos para antenas com cabo de conexão curto. A rede se esquematiza na figura 2.

Para efeitos práticos, na redução dos dados referidos a um ponto sô (estação excêntrica), são consideradas apenas as di-

FIGURA 2

Rede de calibração.



ferências das coordenadas (em latitude, longitude e altitude), tabela 2.

### 1.3,3 Coleta de dados.

Foram planejados períodos de observação, para calibração, antes e depois da campanha em campo. Os aparelhos CMA-751, CMA-761 e JMR-1 chegaram à UFPr no dia 9 de abril de 1985, colocando-se imediatamente os osciladores em aquecimento e carregan-

TABELA 2

Excentricidades das estações (metros).

ESTAÇÃO	$\Delta_\phi$	$\Delta_\lambda$	$\Delta_h$	ESTAÇÃO	$\Delta_\phi$	$\Delta_\lambda$	$\Delta_h$
A1	26,66	-6,21	1,59	A7	29,07	4,53	1,92
A2	22,89	-5,43	1,49	A8	24,11	5,01	1,75
A3	18,22	-4,24	1,12	A9	19,10	5,68	1,35
A4	28,56	-0,37	1,88	A10	22,37	-9,97	1,50
A5	23,66	0,15	1,66	A11	0,88	-2,12	0,86
A6	18,68	0,74	1,25	A12	3,35	0,16	1,40

do-se os programas nos microprocessadores dos CMAs (os JMRs já possuem um programa incorporado em seu equipamento). O receptor Magnavox só chegaria para participar da segunda fase do projeto. Os períodos de observação para calibração são mostrados na tabela 3.

Note-se que no fim da primeira fase voltaram para pós-calibração os receptores JMRs do IBGE e um CMA, sendo que um JMR foi substituído, devido a falhas próprias. O receptor MX-1502 só passou pela fase de pós-calibração, junto com a totalidade dos CMAs.

Enquanto se realizaram as observações para calibração, pelas equipes da UFPr usaram-se listagens de protocolo individuais para cada receptor (identificados com S/N), preenchendo-se com dados de pressão, temperatura, umidade e qualidade dos sinais, para cada passagem - trabalho auxiliado por uma listagem de ALERT, rodado no sistema HP-1000. Este protocolo facilitou

TABELA 3

Períodos de observação para calibração.

RECEPTOR	ABRIL	MAIO
C1		
C2		
C3		
C4		
C5		
J1		
J2		
J3		
J4		
M1		

mais tarde, a operação de leitura das fitas gravadas, verificando a qualidade dos sinais e eventuais erros na leitura.

#### 1.3.4 Problemas encontrados.

A etapa de coleta de dados foi bem sucedida. Todas as fitas foram lidas no computador HP-1000, através da unidade de fita cassete CMA-749. Os dados foram processados pelo programa de votação majoritária EGMJV (vindo da Universidade de Hannover), permanecendo os resultados gravados no sistema para serem transferidos ao computador DEC-10, onde se encontram os programas GEODOPV.

Para possibilitar tal transferência, era necessária uma

unidade de fita magnética de 9 trilhas, que ainda não se encontrava disponível no CPGCG. Contornando esse problema, os dados de pré-calibração foram passados a fitas cassetes do HP-1000 e enviadas para a UH na Alemanha Ocidental, retornando os mesmos dados gravados em fita magnética de 9 trilhas, compatíveis com a leitura no DEC-10.

Na época da transferência dos dados de pós-calibração, já se contava no CPGCG com a unidade de fita HP-7970E do HP-1000. Tais informações estavam arquivadas em disco, depois gravaram-se em fita magnética com densidade de 1600 BPI (Bit per inches). Devido a problemas de programas não foi possível a leitura, na formatação correta, pelo sistema DEC-10, apesar de se tentar encontrar a solução para o problema. Este persistiu até uma etapa em que o processamento e análise da pré-calibração estavam concluídos,

Levando em consideração a escassez de tempo para a finalização do trabalho, o autor desistiu da tarefa de processamento da pós-calibração, centrando análise e conclusões só na pré-calibração. No entanto, como se constatou em trabalho similar na UH, espera-se que os resultados de pré e pós-calibração não apresentem diferenças significativas (Seeber, conversação pessoal), confirmando-se as conclusões nas duas etapas.

## CAPÍTULO II

### 2 POSICIONAMENTO DOPPLER.

O Laboratório de Física Aplicada da Universidade John Hopkins foi um dos pioneiros na utilização do efeito Doppler, para posicionamento geodésico, detectado pelo físico austríaco Christian Doppler em 1842. As pesquisas começaram quando Guier e Weiffembach em 1957, rastrearam o Sputnik I, utilizando o efeito Doppler. McClure propôs a operação inversa: medindo a variação de frequência do efeito Doppler de um satélite de órbita conhecida, deduz-se a posição do observador /01/.

Este princípio foi desenvolvido pela Marinha dos Estados Unidos, criando o Navy Navigational Satellite System (NNSS), para propósitos de navegação de navios de guerra. O sistema de satélites é conhecido como TRANSIT, foi introduzido para uso militar em 1964 e para fins civis em 1967.

O tratamento de observações Doppler e dos modelos matemáticos, para soluções geodésicas, requer cuidadosos modelos dos efeitos instrumentais e dos do meio ambiente.

Neste capítulo, se dará uma breve resenha dos modelos matemáticos básicos de posicionamento geodésico Doppler, por meio de satélites do sistema TRANSIT, com ênfase na modelagem dos efeitos instrumentais,



## 2.1 EFEITO DOPPLER.

O posicionamento geodésico, baseado no efeito Doppler, utiliza uma frequência considerada constante, irradiada pelo satélite ( $f_s$ ), que é detectada no receptor em terra ( $f_r$ ). Sendo  $\dot{R}$  a velocidade radial de aproximação ou afastamento, relativa entre satélite e observador, se obtém a equação básica do efeito Doppler /21/:

$$f_s - f_r = \Delta f_d = f_s \frac{\dot{R}}{c} \quad (1a)$$

ou:

$$f_r = f_s \left( 1 - \frac{\dot{R}}{c} \right) \quad (1b)$$

A figura 3 mostra a posição do satélite em relação à estação, nos instantes  $t_1$  e  $t_2$ , que se encontra às distâncias  $R_1$  e  $R_2$ , respectivamente. Quando o satélite se aproxima da estação, a frequência recebida  $f_r$ , é maior que a frequência transmitida  $f_s$ , obedecendo ao efeito Doppler.

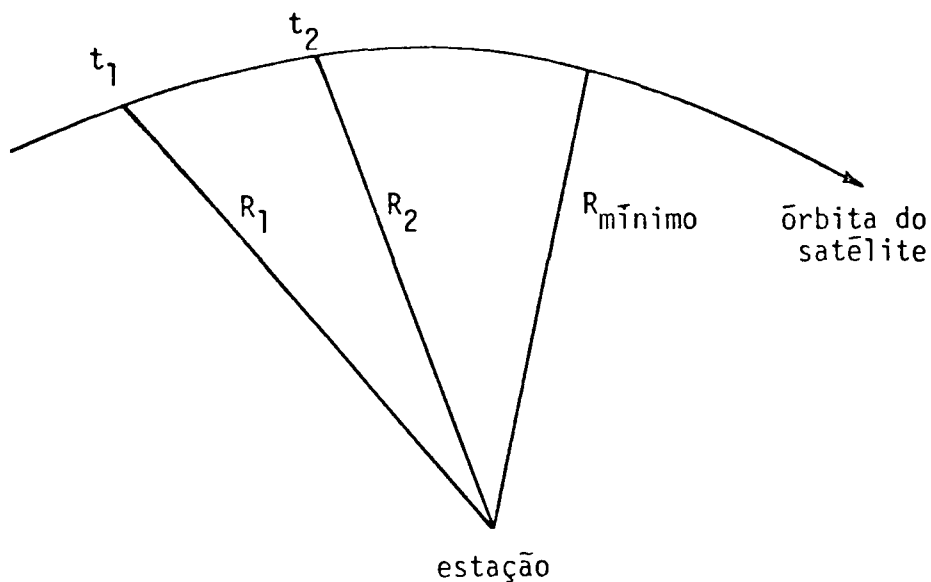
No momento de máxima aproximação do satélite ( $R$  mínimo) a velocidade radial  $\dot{R}$  se anula.

$$\dot{R} = \frac{\Delta f_d \cdot c}{f_s} = 0 \quad (2)$$

Da última equação se deduz que neste instante  $\Delta f_d = 0$ , ou seja,  $f_s$  e  $f_r$  são iguais.

FIGURA 3

Posições do satélite em relação à estação.



## 2.2 EQUAÇÕES BÁSICAS DO POSICIONAMENTO.

As diferenças de frequências são medidas através da contagem do número de ciclos ( $n$ ) num intervalo de tempo  $\Delta t$ , então a medição de  $n$ , entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$ , é dada pela integral [21]:

$$n = \int_{t_1}^{t_2} (f_s - f_r) dt \quad (3)$$

Para obter a contagem Doppler ( $N$ ) propriamente dita, a frequência  $f_s$  é substituída por uma frequência de comparação ( $f_0$ ), disponível em terra.  $f_0$  é uma constante gerada por um oscilador,

instalado no receptor, A contagem Doppler pode ser expressa pela seguinte fórmula:

$$N = \int_{T_1}^{T_2} (f_o - f_r) dT \quad (4)$$

O termo  $(f_o - f_r)$  é chamado frequência de batimento.

Por razões práticas,  $f_o$  é escolhida maior que  $f_r$ , de tal modo que a frequência de batimento seja sempre positiva (como se verifica na figura 4).

$t_1$  e  $t_2$  são as épocas de emissão dos sinais do satélite que correspondem ao começo e fim de uma contagem, e  $T_1$  e  $T_2$  as épocas de recepção em Terra dos mesmos sinais. Deve-se levar em consideração os respectivos retardos de propagação (propagation delay)  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$ , na transformação de  $t_1$  e  $t_2$  para  $T_1$  e  $T_2$ , ou o mesmo:

$$T_1 = t_1 + \Delta T_1 \quad (5a)$$

$$T_2 = t_2 + \Delta T_2 \quad (5b)$$

A figura 5 mostra, nas posições genéricas  $j$  e  $k$  do satélite, distantes  $R_{ij}$  e  $R_{ik}$  da estação  $i$ , a definição do intervalo de integração de uma contagem Doppler, entre as épocas  $t_j$  e  $t_k$ .  $T_k$  e  $T_j$  são os instantes de recepção em Ter-

FIGURA 4

Frequência de batimento.

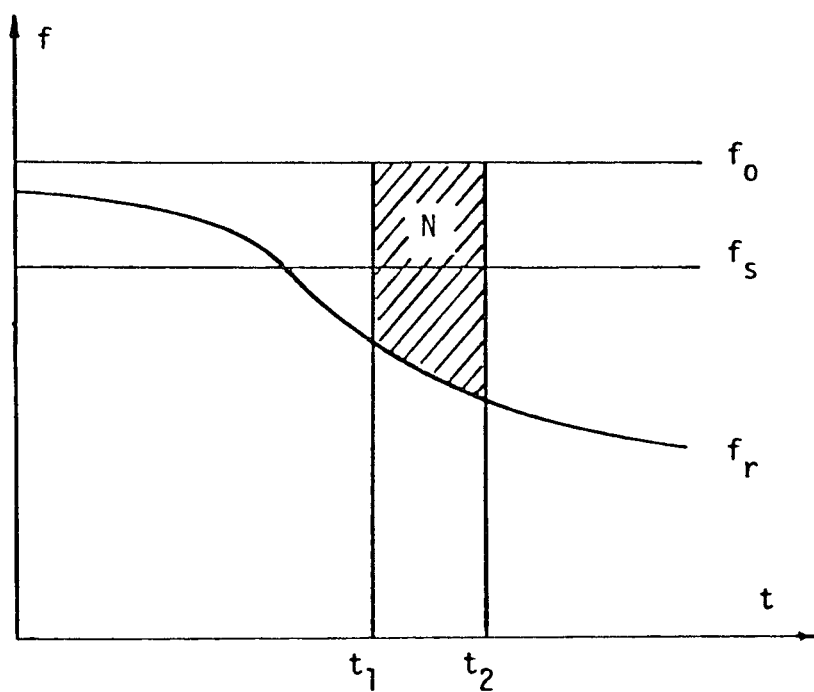
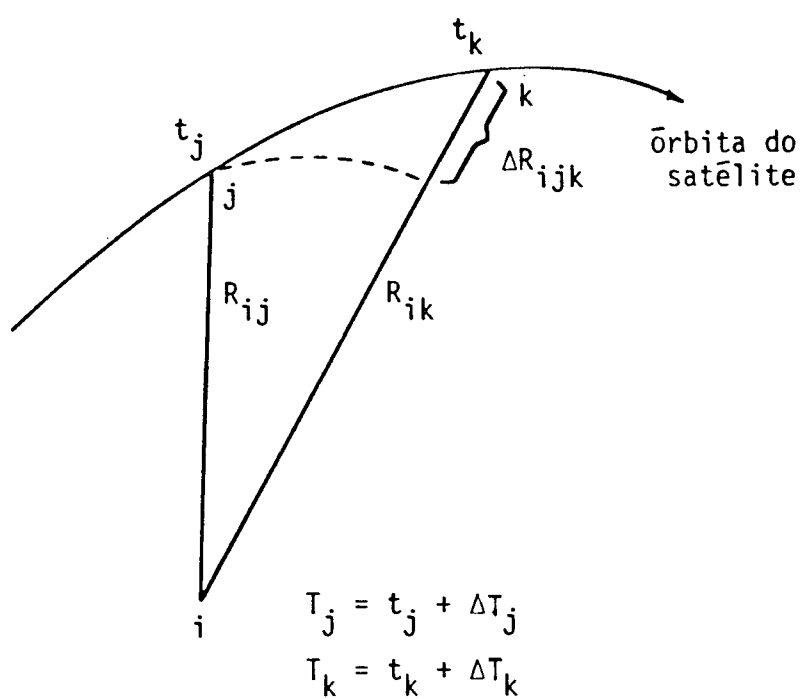


FIGURA 5

Épocas do satélite e da estação.



ra dos sinais que saem do sat elite nos instantes  $t_j$  e  $t_k$  respectivamente, os atrasos de propagação podem ser expressos como:

$$\Delta T_j = \frac{R_{ij}}{c} , \quad (6a)$$

$$\Delta T_k = \frac{R_{ik}}{c} . \quad (6b)$$

Designando por  $N_{ijk}$ , a contagem medida na estac  o  $i$  entre as épocas  $j$  e  $k$ , pode-se escrever:

$$N_{ijk} = \int_{T_j}^{T_k} (f_o - f_r) dt = \int_{T_j}^{T_k} f_o dT - \int_{T_j}^{T_k} f_r dT \quad (7)$$

$$\text{mas: } \int_{T_j}^{T_k} f_o dt = f_o (T_k - T_j) \quad (8)$$

$$\text{e: } \int_{T_j}^{T_k} f_r dt = \int_{t_j}^{t_k} f_s dt = f_s \int_{t_j}^{t_k} dt = f_s (t_k - t_j) \quad (9)$$

A expressão anterior se deve a que: nos diferentes intervalos de tempo, o número de ciclos é igual; então, a expressão 7 pode ser escrita da seguinte maneira:

$$N_{ijk} = f_o (T_k - T_j) - f_s (t_k - t_j) \quad (10)$$

após algumas substituições, esta passa a:

$$N_{ijk} = (f_o - f_s) \Delta t + \frac{f_o}{c} (\Delta R) \quad (11)$$

$$\text{sendo que} \quad \Delta R = R_{ik} - R_{ij} \quad (12a)$$

$$\text{e} \quad \Delta t = t_k - t_j \quad (12b)$$

A expressão 11 é a chamada equação de observação do posicionamento Doppler. A diferença  $(f_o - f_s)$ , desvio de frequência (off-set) do satélite, tem um valor de aproximadamente 32 kHz,

O intervalo de integração depende do instrumento receptor -geralmente é de 4,6 segundos. Muitas vezes se opta por valores entre 20 e 30 segundos, por agrupamento de intervalos de 4,6 segundos, que otimiza a rigidez geométrica /15/.

Na prática, os limites de integração são derivados dos sinais de tempo do satélite, ou do receptor. Para o sistema NNSS, os retardos  $\Delta T$  são menores que 45  $\mu s$  /01/, durante o qual o satélite move-se aproximadamente 30 centímetros.

### 2.3 DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO GEODÉSICA

O posicionamento de uma estação (i), referida num sistema de coordenadas com origem no centro de massa (CM), é obtido a partir de posições conhecidas (1 e 2) do satélite, como mostra a figura 6. A equação de observação fica:

$$N_i = \Delta f \Delta t \frac{f_0}{c} \left\{ \left[ (X_{s2} - X)^2 + (Y_{s2} - Y)^2 + (Z_{s2} - Z)^2 \right]^{1/2} - \right. \\ \left. - \left[ (X_{s1} - X)^2 + (Y_{s1} - Y)^2 + (Z_{s1} - Z)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (13)$$

Desta forma, quatro observações fornecem uma solução única e, havendo dados superabundantes, estes permitem ajustamento pelo método dos mínimos quadrados.

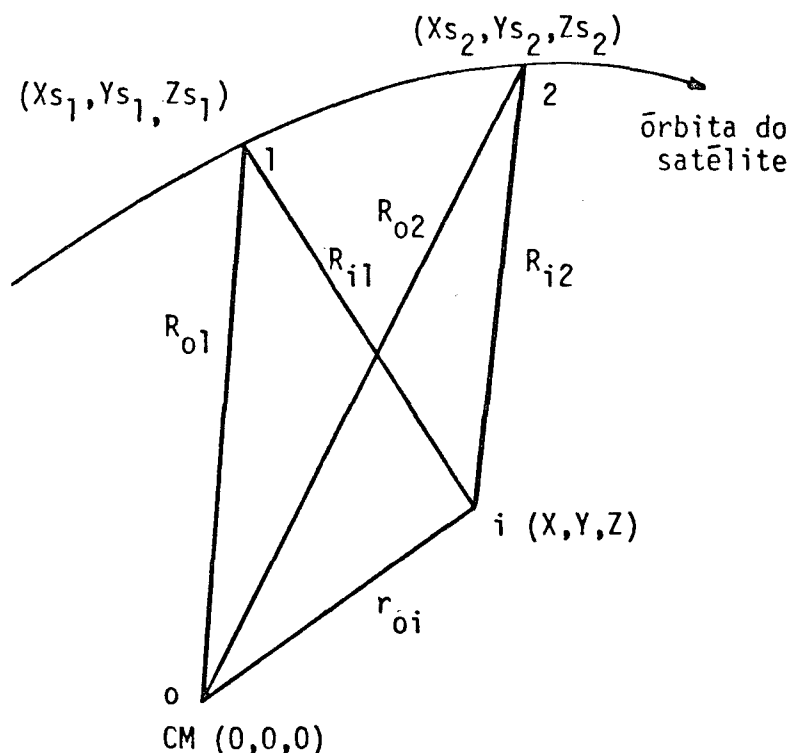
O método Doppler pode ser usado, não somente para determinar a posição absoluta de uma estação num sistema geocêntrico, mas também para determinar posições relativas entre duas ou mais estações.

O fato de várias estações realizarem observações simultâneas, conduz a uma melhora no posicionamento relativo, devido a minimização de erros sistemáticos da órbita e da atmosfera. Esta técnica é chamada de translocação, ou de ajustamento simultâneo em multiestação.

Se a órbita do satélite é considerada exatamente definida (peso infinito), não existirá correlação entre as posições das estações. No estabelecimento de um adequado método de ajustamento, a órbita do satélite deixa de ser exata e seus elementos passam a ser tratados como quantidades quase

FIGURA 6

Determinação da posição geodésica.



observáveis, e dão lugar a uma correlação e conseqüente melhora das posições relativas. Esta técnica é conhecida como relaxação orbital.

Igual tratamento pode ser dado a grandezas próprias do receptor e da atmosfera, tais como: retardo (delay), desvio de frequência (off-set), deriva (drift) do receptor e correção da refração troposférica. Os quatro parâmetros mencionados, podem ser tratados como quase observáveis no programa GEODOPV. Maiores detalhes em 4.3.

Todos os modelos até agora apresentados são válidos somente sob os seguintes pressupostos /23/:



- 1- as épocas nas quais são detectadas as marcas de tempo transmitidas pelo satélite e as épocas em que a frequência de batimento  $(f_0 - f_r)$  é integrada, são idênticas; ou, de outra maneira, as épocas nas quais são dadas as posições do satélite e as épocas de transmissão dos sinais, são referidas à mesma escala de tempo. Posição do satélite e sinais de tempo estão em relação a TUC (Tempo Universal Coordenado);
- 2- as ondas se propagam com velocidade igual a  $c$ ; estas atingem o receptor na época  $T = t + \dot{R}/c$ , ou mais precisamente  $T = t + \int dR / c$ , onde a integração é efetuada através da ligação geométrica entre satélite e receptor (sem considerar as correções de refração);
- 3- a frequência Doppler não é corrigida de efeitos relativistas (equação 9). Isto é, o número de ciclos de  $f_r$  contado entre as marcas de tempo  $T_i$ , é igual ao número de ciclos de  $f_s$  transmitidos entre as épocas  $t_i$ . Contudo, ambos relógios são influenciados pelos efeitos relativistas: especial (dilatação do tempo) e geral (deslocamento gravitacional).
- 4- as frequências  $f_s$  e  $f_0$  permanecem constantes durante uma passagem ( $\sim 18$  minutos), no máximo.

## 2.4 EFEITOS INSTRUMENTAIS.

A instrumentação terrestre Doppler, típica, consiste de uma antena omnidirecional, um receptor de dois canais, um processador/gravador de dados e um oscilador/relógio incorporado no receptor.

Cada componente deste equipamento contribui com uma parcela dos erros instrumentais Doppler. Os mais significativos destes são:

- erro do centro de fase (CF) da antena;
- erro de fase do receptor;
- erro da variação do retardo do receptor;
- erro do oscilador.

#### 2.4.1 Erro do centro de fase da antena.

Este tipo de erro é causado principalmente por reflexões das ondas no solo, provocando caminhos múltiplos, e acarretando significativos erros sistemáticos, especialmente em altura /15/. Tais erros em altura, podem atingir vários decímetros em equipamentos modernos /13/. Estes podem ser diminuídos usando antena direcional ou antena omnidirecional com zero sensibilidade sob o horizonte /15/.

São escassas as informações disponíveis fornecidas pelos fabricantes, acerca do CF das antenas. Anderle e Tannenbaun mostraram que a posição de uma estação é referida ao ponto R da antena, marcada na haste vertical, figura 7.

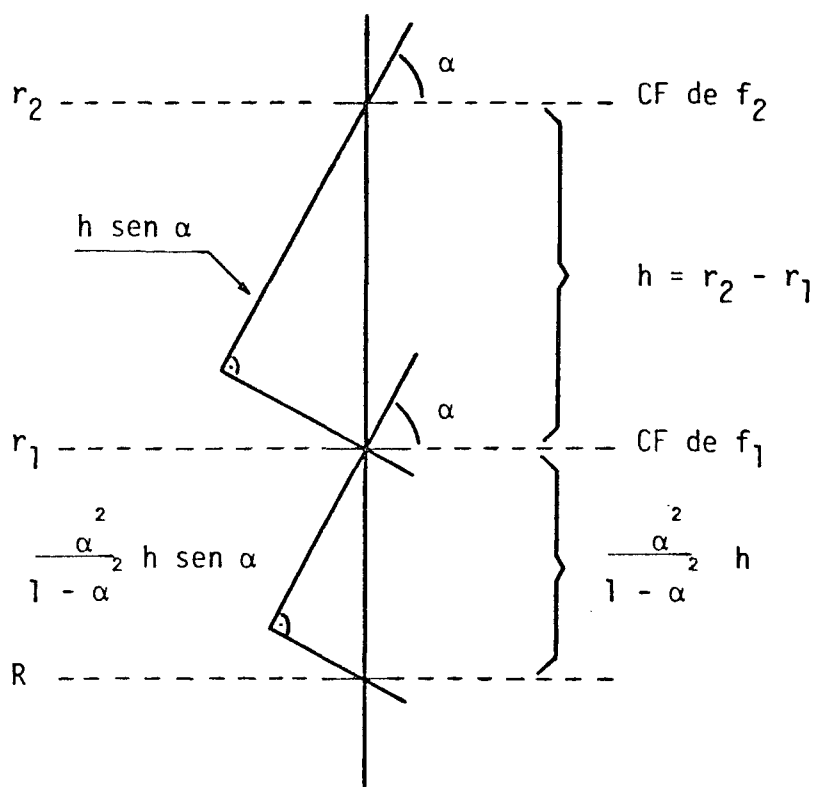
R resulta da seguinte expressão dada em /13/:

$$R = r_1 - (r_2 - r_1) \frac{\lambda^2}{1 - \lambda} \quad (14)$$

onde:

FIGURA 7

Centro de fase (CF) da antena.



$r_1$  é o vetor posição do CF para a alta frequência  $f_1$  (400 MHz)

$r_2$  é o vetor posição do CF para a baixa frequência  $f_2$  (150 MHz)

$$\lambda = \frac{f_2}{f_1} = \frac{3}{8} \quad (\text{para as frequências } 150/400 \text{ MHz})$$

$\alpha$  é o ângulo de incidência das ondas

Na realidade os CF, para as duas frequências, não são fixos, variam de passagem para passagem e também durante uma mesma, de acordo com o ângulo de elevação, potência do sinal e condição do solo /13/.

A mudança do ângulo de elevação aparece como ruídos nos dados, enquanto a variação da potência do sinal se apresenta como tendenciosidade na altura da estação.

Wells numa experiência em 1972, reportou as medições da altura de CF para 150 e 400 MHz, em diferentes ângulos de elevação e diferentes alturas de antena, usando duas antenas de marcas diferentes. Nesta experiência se constatou que a frequência de 400 MHz é mais ou menos estacionária, para dados recebidos entre 10 e 60 graus de elevação, os quais representam cerca de 90 % da totalidade dos dados de uma passagem. A mudança mais pronunciada está ligada à potência do sinal perto de zero e ao predomínio de sinais refletidos pelo solo.

Para diferentes alturas de antenas, a variação do CF médio para 400 MHz - entre 10 e 60 graus-, pode atingir até 0,15 metros em alguns casos.

A situação mais complexa é para a frequência menor (150 MHz) onde, para elevações entre 10 e 60 graus, a variação do CF médio alcança 0,50 metros. A separação dos dois CF depende da altura da antena em relação ao solo.

Afortunadamente, a solução resultante dos dois CF é muito mais sensível ao CF de 400 MHz. Qualquer erro devido ao deslocamento do CF de 150 MHz, deve ser multiplicado por  $\lambda^2 / 1 - \lambda^2 = 0,16 / 13$ , que é uma constante usada na correção da refração ionosférica. As médias acima mencionadas, correspondem para uma altura de antena em torno de 0,80 metros.

Por estas razões é assumido que o CF se conhece dentro de uma precisão de 0,10 a 0,20 metros, para uma passagem simples.

Novas antenas projetadas, reduzem a incerteza de altura do CF, até valores menores que o decímetro.

#### 2.4.2 Erro de fase do receptor (retardo Doppler).

O receptor introduz um erro, em que a fase do sinal Doppler, modulado em fase, pode mudar durante uma passagem. Tal variação, devida a mudanças na potência do sinal e temperatura, pode atingir até  $180^\circ$  do sinal Doppler ou frequência de batimento ( $f_o - f_r$ ), que aproximadamente corresponde a  $15 \mu s$  para 32 KHz, em equipamentos modernos.

O erro pode ser diminuído melhorando os componentes de novos receptores ou medições em tempo real.

Este erro é governado por propagação não processada (comprimento do cabo da antena) e retardo na filtragem /23/, que afeta diretamente às contagens Doppler.

#### 2.4.3 Erro da variação do retardo do receptor.

Para decodificar a mensagem e extrair os dados digitais e os referentes ao tempo, se requer consideravelmente maior tempo de processamento que para decodificar o sinal Doppler. Consequentemente o retardo do receptor é maior que o retardo Doppler. O retardo do receptor afeta diretamente o intervalo de integração.

O conhecimento destes dois tipos de retardos é necessário na sincronização dos relógios do satélite e do receptor (ver seção 2.5).

O tempo transcorrido entre a recepção do sinal e a sua decodificação, usualmente é entre 500 e  $1.200 \mu s$ . Idealmente

deve ser constante, no entanto, variações podem ocorrer durante uma passagem ou de uma para outra. A consideração não é se o receptor possui um retardo alto ou baixo, mas sim, se o retardo permanece constante. Receptores bem projetados devem ter uma variação máxima de  $50 \mu s$ , que equivale a aproximadamente 0,35 metros em "along track".

Muitas vezes, as variações são separadas em componentes de longo período -maior que o intervalo de integração-, que junto com o retardo Doppler médio, servem para "deslocar" o intervalo de integração, e em componentes de curto período -menor que a ordem do intervalo de integração-; este é usualmente percebido como "trêmulo" e serve para modificar o comprimento do intervalo de integração /23/.

#### 2.4.4 Erro do oscilador/relógio,

Embora o relógio local seja gerado pelo oscilador do receptor, diferenciam-se os erros do relógio e oscilador.

O erro do relógio é devido principalmente a sua resolução e é pequeno /15/; outros erros sistemáticos (excluindo a deriva), podem ser negligenciados para uma passagem típica de cerca de 1.000 segundos.

O erro do oscilador é produto da instabilidade da frequência de referência  $f_0$  e afeta diretamente às contagens. Esta contribuição pode ser relacionada com a variância Allan  $\sigma_a^2$ , segundo /15/, convencionalmente usada para caracterizar a estabilidade da frequência referida ao tempo.

Em /17/, a variância Allan é definida a partir da variância simples, sob a condição que o número de elementos é igual a 2, relacionando contagens Doppler adjacentes; é expressa como:

$$\sigma_a^2(t) = \left\{ \frac{(y_{k+1} - y_k)^2}{2} \right\} \quad (15a)$$

onde  $\{\}$  denota uma média infinita de tempos, e  $y_k$  é o desvio observado médio da frequência nominal, no k-ésimo intervalo de tempo.

Sua expressão é:

$$\sigma_a^2(\Delta t) c^2 \Delta t^2 = \sigma_d^2(\Delta t) (1 - \rho(\Delta t)) \quad (15b)$$

onde:  $\sigma_d^2$  é a variância de uma contagem Doppler

$\Delta t$  o intervalo de integração

$\rho$  o coeficiente de correlação entre contagens Doppler adjacentes

$c$  a velocidade da luz no vácuo

Pelo quarto postulado da seção 2.3, assume-se que  $f_o$  permanece constante durante uma passagem, sendo  $f_{oo}$  o valor nominal de 400 MHz (comum para  $f_o$  e  $f_s$ ), pode-se assumir também que o desvio de frequência do receptor ( $f_o - f_{oo}$ ), permanece constante numa passagem.

## 2.5 PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE OBSERVAÇÃO DOPPLER,

As medições realizadas por receptores de satélites do sistema Transit podem ser incorporadas à equação de observação. Das duas classes de receptores existentes (navegação e geodésicos), a diferença está em que, nos geodésicos, a precisão da medição é melhorada com o uso do oscilador terrestre como referência, que gera um relógio local.

O postulado número um da seção 2.3 falha por dois motivos:

- a escala de tempo coberta pela detecção de sinais do satélite é influenciada por várias fontes de ruídos na propagação e decodificação;
- a contagem é um número inteiro (vezes que a onda senoidal da frequência passante pelo zero, de negativo a positivo), figura 8.

A figura 8 esquematiza a frequência de batimento. Designando por  $T_i^*$  a escala de tempo que marca a integração de contagens inteiras e por  $T_i$  o tempo de integração controlado pela decodificação de sinais do satélite. O valor máximo da diferença ( $T_i^* - T_i$ ) é menor que  $0,5 \mu s$ .

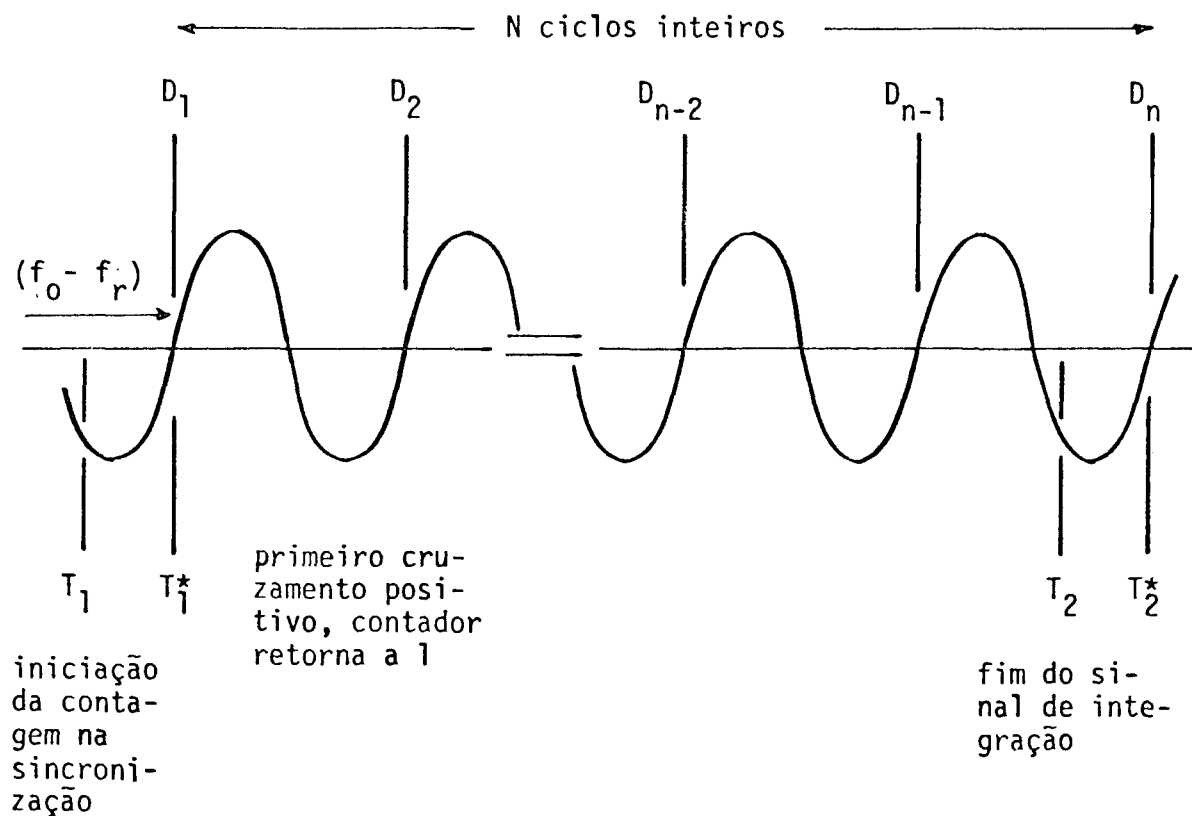
Para reduzir os dois efeitos mencionados supra, deduz-se o intervalo de integração, a partir das marcas de tempo do oscilador terrestre, nos receptores, normalmente, a diferença ( $T_2 - T_1$ ) é aproximadamente de 4,6 segundos.

A utilização de um relógio local permite uma maior resolução, fornecendo contagens "fracionadas" através de sinais derivados do oscilador local, sincronizados com o satélite.



FIGURA 8

Contagens Doppler da frequência de batimento.



$T_i$ : época na qual o sinal de tempo é detectado

$T_i^*$ : época do primeiro zero positivo de  $(f_0 - f_r)$  após  $T_i$  — o contador retorna a iniciar a contagem

$D_i^j$ : primeiro ciclo de uma contagem

Estes submúltiplos de frequência incrementam a contagem inteira em até 0,01 partes de ciclo /21/, /23/.

A equação 2.48 de /23/ modela a diferença  $\Delta t_i$  entre as épocas de contagens inteiras ( $T_i^*$ ) e as épocas na escala de tempo derivadas do oscilador do satélite ( $t_i$ ), esta é:

$$\Delta t_i = T_i^* - t_i = \Delta t_0 + \frac{f_0(t_0) - f_{00}}{f_{00}} (t - t_0) + \frac{\dot{f}_0}{2f_{00}} (t - t_0)^2 \quad (16)$$

que é chamada equação de sincronização, onde:

- $\Delta t_0$  é a diferença de época na sincronização ocorrida na época  $t_0$ ;
- $f_{00}$  é o valor nominal de  $f_0$  ( $= 400$  MHz);
- $\dot{f}_0$  é a deriva do longo período do oscilador local.

O termo  $(f_0 - f_{00})$  é chamado de desvio de frequência do oscilador do receptor.

Na equação 16 existem três constantes:  $\Delta t_0$ ,  $(f_0(t_0) - f_{00})/f_{00}$  e  $\dot{f}_0/f_{00}$ .

$\Delta t_0$  é composta dos retardos de propagação e do receptor, ambos determináveis.

O retardo de propagação varia entre 3000 e 13000  $\mu s$ , dependendo da elevação do satélite e, pode ser calculado com precisão de poucos  $\mu s$ , a partir das coordenadas aproximadas do satélite e do receptor. Um erro de 1  $\mu s$  causa, em distância, uma incerteza cerca de 300 m.

O retardo do receptor é da ordem de 500 a 1200  $\mu s$ , dependendo do receptor, com uma variação de 30 a 50  $\mu s$ . Estes valores podem ser obtidos em laboratórios.

O desvio de frequência do receptor e deriva do oscilador, podem ser determinados mantendo um registro, passagem a passagem, do desvio de frequência do satélite.

O desvio de frequência do receptor pode ter valores entre 100 e 1000 partes em  $10^{10}$  e a deriva do receptor é mais ou menos 10 partes em  $10^{10}$  por dia.

Uma aplicação da equação 16 é estimar um ou mais dos três parâmetros, a partir de medições de  $\Delta t_i$  médio, para cada passagem. Para obter o seu valor médio, a cada registro de  $T_i^*$  é subtraído seu equivalente  $t_i$  (corrigido dos retardos de propagação e nominal do receptor).

Reformulando a equação de observação (13), num modelamento mais genérico, segundo /14/ pode-se escrever a seguinte função, para cada contagem Doppler integrada:

$$F_i = (R_k - R_j) \frac{f_{oj}}{c} + (f_{oj} - f_s) \Delta t_{jk} + s_i - (N_i + E_i) = 0 \quad (17)$$

Sendo  $j$  e  $k$  posições genéricas (temporais ou espaciais), que delimitam o intervalo de integração de uma contagem Doppler.

$R_j$  e  $R_k$  são as distâncias satélite-estação terrestre, de coordenadas corrigidas da aberração, devida à rotação da Terra.

$f_{oj}$  é a frequência terrestre (400 MHz) atualizada, desde um valor inicial  $f_o(t_o)$ , na época do começo da observação dada pela relação:

$$f_{oj}(t_j) = \dot{f}_o (t_j - t_o) + f_o(t_o) \quad (18)$$

$\dot{f}_o$  é a taxa de deriva de longo período do oscilador local.

$(f_{oj} - f_s)$  é o desvio de frequência do satélite (~32 KHz).

$\Delta t_{jk}$  é o intervalo de integração.

$s_i$  representa a modelagem dos erros sistemáticos, devido ao receptor, à refração troposférica e à órbita.

$N_i$  é a contagem Doppler corrigida das refrações ionosfê-

rica e troposférica nominal, efeitos relativistas e devidos à rotação da Terra.

$E_i$  representa os erros aleatórios de  $N_i$ .

O modelo dos erros sistemáticos é expresso em /14/, sob a seguinte forma:

$$s_i = \frac{\partial}{\partial \underline{0}} (S_k - S_j) d\underline{0} + \frac{\partial}{\partial t} (S_k - S_j) d\delta - \frac{Dtr}{100} dk + \Delta t_{jk} (t_j - t_{cpa}) d\dot{f}_0 \quad (19)$$

$\underline{0}$  indica a relaxação de até seis parâmetros orbitais Keplerianos

$dk$  é a proporção de correção em porcentagem da correção da refração troposférica nominal.

$Dtr$  é a correção nominal de refração troposférica, é obtida a partir de:

$$Dtr = \left[ \Delta S(E_j) - \Delta S(E_k) \right] \frac{f_0}{c} \quad (20)$$

$d\delta$  é a correção de retardo do receptor.

$\Delta S(E_j)$  e  $\Delta S(E_k)$  são respectivamente as correções das distâncias, no começo e fim do intervalo de integração, devido à refração troposférica nominal e, é função dos ângulos de elevação  $E_j$  e  $E_k$  do satélite.

$(t_j - t_{cpa})$  é a diferença entre a época de máxima proximidade do satélite (closest point approach) e uma época qualquer da contagem. Seu valor máximo é em torno de 9 minutos.

$d\dot{f}_0$  é a deriva curta da frequência, devido ao termo de curto período (variações dentro de uma passagem), da ins-

tabilidade do oscilador local e  $\bar{e}$  em relação a deriva  $\dot{f}$  de longo período.

Os tempos  $t'_j$ , derivados do receptor, são corrigidos da deriva de frequência e usados para calcular os tempos de emissão de sinais  $t_j$  do satélite, através da fórmula:

$$t_j = \left(1 - \frac{f_{0j} - f_{00}}{f_{00}}\right) t'_j - \frac{S_j}{c} \quad (21)$$

Lembrando a equação 9, o satélite transmite as marcas de tempo em instantes  $t_j$ , e serão decodificados pelo receptor sô no instante  $T_j = t_j + R_j/c + \delta_j$ .

Assume-se que o retardo do receptor  $\delta$  é constante, durante e entre passagens. De fato, o retardo, num instante  $T_j$ , pode ser expresso como /23/:

$$\delta_j = \delta_c + \delta_j^v + \delta_j^d + \delta_j^z \quad (22)$$

onde:

$\delta_c$  : é o retardo médio de tempo de longo período do receptor.

É constante durante uma passagem.

$\delta_j^v$  : são as variações de curto período do retardo do receptor.

$\delta_j^d$  : é o retardo da frequência Doppler.

$\delta_j^z$  : é a diferença de tempo entre o instante em que o sinal é detectado e o primeiro cruzamento pelo zero positivo, da frequência Doppler.

O termo de curto período  $\delta^v$ , (ver seção 2.4.3) depende das variações de condições atmosféricas e potência do sinal. Para a maioria dos receptores toma valo-

res em torno de 30  $\mu$ s.

O retardo Doppler  $\delta^d$  é causado por momentâneos atrasos da onda nos filtros (ver 3.3.1). Em magnitude é muito menor que o retardo anterior -usualmente é de 10  $\mu$ s-, com desvio padrão praticamente nulo /23/.

O erro de  $\delta^z$  é entre 0 e 1 contagens, com desvio padrão de aproximadamente 0,3 contagens.  $\delta^z$  é praticamente eliminado nos receptores por ampliação da frequência Doppler (secção 2.5).

Os sinais devem ser disponíveis para incrementar as contagens Doppler no instante  $T_j + \delta_j^d$ ; porém, os retardos do receptor excedem o retardo Doppler (veja 2.4.3), sendo os sinais de tempo registrados sô em  $T_j + \delta_c + \delta_j^v$ , após  $T_j + \delta_j^d$ .

Com isto, se cria um problema aparente, em que começada a contagem, o sinal de tempo ainda não é disponível. Então na equação 7, os limites de integração não são mais  $T_j$ , mas sim  $T_j + \delta_j$ .

A expressão 7 pode ser reformulada da seguinte maneira:

$$N = \int_{T_1 + \delta_1}^{T_2 + \delta_2} (f_o - f_r) dT = \int_{T_1}^{T_2} (f_o - f_r) dT + \int_{T_2}^{T_2 + \delta_2} (f_o - f_r) dT - \int_{T_1}^{T_1 + \delta_1} (f_o - f_r) dT \quad (23)$$

A primeira integral resulta na equação 7 . Da equação 1b, tem-se uma expressão genérica para as duas seguintes integrais:

$$\int_{T_j}^{T_j + \delta_j} (f_o - f_r) dT = (f_o - f_s) \delta_j + \frac{f_s}{c} \dot{R}(T_j) \delta_j \quad (24)$$

A expressão (23) vem a ser:

$$N = (f_o - f_s) (t_2 - t_1) + \frac{f_o}{c} [R(t_2) - R(t_1)] + \Delta_c + \Delta_d \quad (25)$$

sendo:

$$\Delta_c = (f_o - f_s) (\delta_2 - \delta_1) \quad (26)$$

$$\Delta_d = \frac{f_s}{c} (\dot{R}(t_2) \delta_2 - \dot{R}(t_1) \delta_1) \quad (27)$$

onde:

$\Delta_c$  é a correção da contagem Döppler, devido à mudança de comprimento do intervalo de integração, e  $\Delta_d$  é a correção, devido ao deslocamento do intervalo de integração.

Segundo Thorndike, em /23/,  $\Delta_c$  não introduz tendenciosidade, mas sim ruídos na contagem; porém,  $\Delta_d$  introduz ruídos mas não tendenciosidade perto do horizonte e, provoca tendenciosidade e não ruídos cerca da aproximação máxima.

De acordo com o modelo do programa GEODOPV (expressão 19),

o valor nominal de  $\delta_c$  é usado como aproximação (com seu peso correspondente). Representa também o efeito combinado de  $\delta_j^v$ ,  $\delta_j^z$  e  $\delta^d$ .



## **CAPÍTULO III**

### **3 RECEPTORES GEODÉSICOS.**

Para um melhor entendimento do desempenho de um receptor geodésico, de satélites do Sistema NNSS, deve-se ilustrar, primeiramente, acerca das características do funcionamento do receptor.

#### **3.1 INFORMAÇÃO RECEBIDA.**

Os satélites (usualmente 5) circulam em órbita polar, a uma altitude aproximada de 1075 km, com revolução periódica cerca de 107 minutos. Estes, emitem duas frequências portadoras de 150 e 400 MHz. Ambas são moduladas em fase e carregam o mesmo tipo de informação. Consistem em: sinais de tempo, informação orbital — em forma de efemérides preditas (operacionais) — e identificação do sinal.

A transmissão da mensagem consiste de 6103 bits a cada 2 minutos. Estes 6103 bits, constituem 156 palavras de 39 bits e, uma palavra extra de 19 bits. A figura 9 mostra a estrutura lógica da informação.

Das 156 palavras, os receptores geodésicos Doppler decodificam somente 25. As palavras são ordenadas de tal maneira

FIGURA 9

Estrutura l3gica da mensagem do sat3lite.

		palavras decodificadas							
grupos da mensagem	1	3	4	5	6	7	8	parâmetros variáveis	
	2	9	10	11	12	13	14		
	3	15	16	17	18	19	20		
	4	21	22	23	24	25	26		
	5	27	28	29	30	31	32		
	6	33	34	35	36	37	38		
	7	39	40	41	42	43	44		
	8	45	46	47	48	49	50		
	9	51	52	53	54	55	56	parâmetros fixos	
	10	57	58	59	60	61	62		
	11	63	64	65	66	67	68		
	12	69	70	71	72	73	74		
	13	75	76	77	78	79	80		
	14	81	82	83	84	85	86		
	15	87	88	89	90	91	92		
	16	93	94	95	96	97	98		
	17	99	100	101	102	103	104		
	18	105	106	107	108	109	110		
	19	111	112	113	114	115	116		
	20	117	118	119	120	121	122		
	21	123	124	125	126	127	128		
	22	129	130	131	132	133	134		
	23	135	136	137	138	139	140		
	24	141	142	143	144	145	146		
	25	147	148	149	150	151	152		
	26	153	154	155	156	157	1	2	

4,601016 s

que formam 25 grupos e, dentro de cada um deles, sã uma palavra é decodificada. A duração da transmissão destes grupos é de 4,601016 segundos e o último (Nº 26) é transmitido num lapso de 4,97460 segundos contendo marcas de tempo, sendo que uma delas coincide com os minutos pares de TU.

As primeiras 8 palavras contêm dados variáveis ou efêmeros, correspondentes ao arco de órbita, a partir dos 12 minutos anteriores até os 16 minutos posteriores à mensagem. Portanto, estas palavras — exceto a primeira — vão se repetindo na transmissão seguinte de 2 minutos, mudando de posição. As próximas 14 palavras consistem de dados orbitais fixos ou médios. As últimas 3 palavras decodificadas são zeros, ou uma marca de identificação, para uma passagem de injeção de novos dados.

O último grupo possui as duas marcas de tempo. A palavra Nº 3 — primeira do primeiro grupo —, é um sinal "beeper", de 400 Hz.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS.

Todos os receptores, neste trabalho considerados, recebem sinais transmitidos pelos satélites do sistema NNSS, projetados para fins geodésicos. A operação básica do sistema é como se segue:

- a- cada receptor contém um oscilador preciso — mas numa proporção menor que o do satélite — de cristal, que gera uma frequência de referência estável, e um relógio local. Quando o satélite se eleva sobre o horizonte, de tal modo que seja captado pela antena, o receptor entra

em sincronia (lock-on), que quer dizer que não somente está recebendo as frequências, como está em fase. Às marcas de tempo, nos minutos pares, o relógio do receptor é sincronizado com o do satélite, permitindo que sejam decodificadas as palavras da mensagem do satélite, a uma taxa aproximada de 4,6 segundos por palavra.

- b- a partir do oscilador, é gerada uma frequência de 5 MHz, e desta são produzidas as frequências nominais de 150 e 400 MHz. Estas duas frequências são comparadas e demoduladas com os sinais do satélite. A resultante de cada uma delas é chamada de frequência de batimento. A cada certo lapso, o número de batimentos da diferença entre o sinal recebido e o gerado, é contado para cada frequência. Esta é a contagem Doppler  $N$ , dado observável destes instrumentos.

O referido intervalo de tempo, é mensurado entre as recepções de duas palavras decodificáveis (~ 4,6 segundos). Cada instrumento considerado, registra da mesma maneira os tais intervalos. Considerando que, o começo da primeira contagem não deve coincidir com o cruzamento pelo zero positivo da frequência Doppler (ver secção 2.5), ou seja, entre o instante em que a marca de tempo é recebida do satélite, e o tempo em que o cruzamento é registrado. Uma contagem "fracionária" deve ser obtida por um processo a posteriori, eliminando este erro de aproximação das contagens que caso contrário, seriam inteiras;

- c- os dados finalmente obtidos, consistem de informação de tempo, contagens Doppler e efemérides do satélite, que são usados num ajustamento para deduzir coordenadas da estação (ou diferenças), no referencial do satélite.

- d- os receptores medem contagens em ambas as frequências (150 e 400 MHz), só para que a correção de refração ionosférica de primeira ordem possa ser aplicada. Esta correção se não aplicada, pode causar erros da ordem de dezenas de metros, na determinação da posição. Visto que os instrumentos que possibilitam esta correção são os geodésicos, (registram as duas frequências), sendo portanto, mais precisos que os de navegação.
- e- cada conjunto de recepção terrestre, possui os seguintes componentes:
- antena portátil, usualmente contendo um pré-amplificador;
  - oscilador que gera uma frequência de referência e um relógio local;
  - receptor eletrônico para detectar a variação de frequência Doppler, decodificar a mensagem e medir as contagens, tempo e potência dos sinais;
  - unidade de fita cassete para gravar os dados;
  - fonte de força, em forma de bateria interna, para sustentar o oscilador/relógio e componentes eletrônicos, em todo momento, e uma fonte de força externa (usualmente bateria de 12 v) para fornecer a energia de operação;
  - visor e teclado, possibilitando o comando e entrada de dados pelo operador, tais como dados meteorológicos, posição aproximada da estação, hora, etc.

Na tabela 4 se faz uma recompilação das características físicas dos receptores utilizados no projeto.

TABELA 4

## Características físicas dos receptores

CARACTERÍSTICA	CMA-751	JMR-1
Peso:		
instrumentos	19,1 (kg)	20 (kg)
antena	13,3 + tripê	-
tôtal	31,4	20
Tamanho:		
instrumentos	20 x 54 x 48 (cm)	30 x 71 x 48 (cm)
antena	20 x 17 x 50	(incluidos no
CMA-749	29 x 42 x 19	volume único)
tôtal de peças	3 + tripê	1
Consumo:		
mêdio	12 (watts)	4,5 (watts)
em rastreo	16	?
Precisão oscilador:		
curto período (1)	$1 \times 10^{-12}$	$5 \times 10^{-12}$
Retardo receptor:	400 - 600 ( $\mu$ s)	100 - 600 ( $\mu$ s)
Auto teste:	sim	não
Registra ambas freq.:	sim	não
Formato de dados:	brutos (opção votados)	brutos
Dados meteorolôgicos ingressados automaticamente:	sim (com ESU) (2)	sim (com METS) (2)
Solução em tempo real:	sim (com memória extra)	sim (off-line)
Translocação em tempo real:	não	sim

(1) sobre um intervalo de 100 segundos

(2) unidades de sensoriamento meteorolôgico

### 3.3 RECEPTORES CANADIAN MARCONI CMA-751, CMA-761.

O modelo CMA- 751 foi introduzido no mercado em 1976. Uma versão mais robusta deste, com embalagem à prova de água, com as mesmas características eletrônicas e memória adicional, é o modelo CMA-761. Portanto, no transcorrer do trabalho, as menções às características do CMA-751, devem ser consideradas iguais para o CMA-761.

O conjunto é capaz, de operar com bateria de 12v-CC ou conectado à rede de 110/220 v-CA. Consome aproximadamente 12w, quando se encontra em rastreo e, consideravelmente menos, quando inativo entre passagens de satélites.

A principal diferença entre o CMA-751 e os outros instrumentos, é que em operação, é inteiramente controlado por um microprocessador de 4 k de memória mínima, e o conjunto é separado da unidade gravadora de fita cassete CMA-749. Esta unidade é usada inicialmente para introduzir na CMA-751 o programa de operação de solução em ponto simples com as efemérides operacionais, em tempo real e, numa etapa posterior, para a gravação dos dados — incluindo as contagens —, em código ASCII (American Standard Code for Interchange of Information) ou BCD (Binary Coded Decimal). Uma fita cassete suporta aproximadamente 40 passagens votadas.

O sistema da antena é pouco usual, por ser muito largo e pesado. Sendo a antena de mais difícil manuseio, deve ser montada sobre um tripê de teodolito.

Outra particularidade importante: o registro da leitura do relógio, para cada passagem em sincronia (lock-on), é realizado durante a mesma. Isto permite cobrir a deriva de longo período do oscilador /02/.

Uma opção possível é o uso da unidade de sensoramento de temperatura e pressão (Environmental Sensor Unit — ESU), que fornece durante o rastreo — diretamente à CMA-751 — a temperatura, a pressão e umidade ambientais. Ficam registradas, essas informações, para cada passagem, na CMA-749. Neste trabalho não se encontrou disponível a mencionada unidade.

Algumas opções adicionais foram utilizadas na etapa de calibração:

- CPU (Central Processor Unit) adicional para programação de seleção de passagens, votação majoritária no próprio instrumento e solução 2-D (bidimensional) ou 3-D (tridimensional) da estação em tempo real;
- transferência de dados para a unidade de fita magnética de 9 trilhas do computador HP-1000, através da CMA-749 (como leitora), para pós-processamento;
- unidade "Simulador de satélites", para auto-teste do receptor (excluindo a antena).

### 3.3.1 Tempo

Os receptores CMA-751, geram o sistema de tempo para as contagens Doppler, baseado no relógio local (Receiver time frame). Este por certo, deve ser sincronizado com a marca do relógio do satélite. O referencial local de tempo contorna a dificuldade de tempo absoluto e assegura um trêmulo mínimo, mas requer que o retardo do receptor seja cuidadosamente controlado pelo sinal de tempo na sincronização. Em /03/ este modo de operação é chamado de sinal de razão constante (constant bit



rate — CBR) no equipamento CMA-751.

Três são as razões de variação de tempo dos sinais vindos dos satélites:

- 1- os retardos de propagação variam e são diretamente proporcionais à variação Doppler.
- 2- ajuste ao sistema do satélite. As correções de tempo são emitidas a passos periódicos de 2 minutos e coincidentes com os minutos pares de TUC (Tempo Universal Coordenado). Essa marca de tempo será mantida com precisão de 10 microsegundos, por ajuste periódico de sinais selecionados da mensagem do satélite, cada aproximadamente 9,6 microsegundos.
- 3- variações do retardo ocorrem no receptor. Os filtros, pelos quais passam as ondas (filtros de entrada e saída das ondas no receptor), contribuem a tais variações.

### 3.3.2 Contagens Doppler.

O referencial de tempo, é por último, usado para limitar os intervalos de integração das contagens. O CMA-751 fornece a contagem Doppler fracionária com uma resolução de 1/64 contagens, e o tempo medido com precisão de  $\pm 0,2$  microsegundos.

### 3.3.3 Estabilidade do oscilador.

Osciladores de cristal de quartzo são usados nos receptores CMA-751. Segundo os fabricantes, o oscilador possui uma estabilidade de curto período, em torno de 1 parte em  $10^{-12}$ .

### 3.4 RECEPTOR JMR-1.

O receptor JMR-1 é disponível desde 1973. Foi o primeiro portátil compacto, incluindo novas características, tais como: gravação de dados em fita cassete, correção automática da refração ionosférica de primeira ordem e baixo consumo de energia.

As características eletrônicas e de operação dos JMR-1 são um pouco diferentes do CMA-751, em alguns itens como:

- a- o conjunto do receptor, consiste: de receptor/unidade de fita cassete, antena, cabos e outras partes pequenas, transportáveis num só volume e de pequeno porte;
- b- o receptor aplica a correção de refração ionosférica de primeira ordem internamente, e registra só as contagens de 400 MHz corrigidas (as de 150 MHz, são somente detectadas e não gravadas). Com isto, utiliza menos espaço na fita cassete, para armazenar cada passagem.
- c- o receptor não é comandado por microprocessador. A operação e formatação de dados é controlada pelo próprio equipamento (hardware) e não por programas (software).
- d- auto-teste dos componentes eletrônicos não é possível, (embora qualquer operador possa efetuá-lo externamente). Qualquer reparo em campo é virtualmente impossível.

Os dados gravados em fita são compatíveis ao código ASCII, mediante o leitor de cassetes JMR-1CRR. As fitas podem armazenar a informação de até 43 passagens em forma de dados brutos.

Encontra-se disponível pouca informação, em relação aos JMR-1, no que diz respeito às características quantitativas do receptor. O autor não encontrou em bibliografia alguma estuda-

da, informação à respeito da precisão relativa às contagens Doppler e à leitura do relógio.

#### 3.4.1 Tempo.

O relógio local registra a hora e sua informação é gravada. A sincronização é efetuada com 4,9156 segundos de retardo à captação da marca do sinal, do primeiro intervalo da mensagem transmitida pelo satélite.

#### 3.4.2 Contagens Doppler.

As contagens gravadas são de 55/64 da verdadeira contagem no vácuo, para a frequência de 400 MHz, em intervalos de integração de 4,6 segundos nominais.

#### 3.4.3 Estabilidade do oscilador.

A estabilidade de curto período para o oscilador do JMR-1 é 5 partes em  $10^{-12}$ .

## CAPÍTULO IV

### 4 PROCESSAMENTO DOS DADOS.

Uma redução otimizada de dados, obtidos com utilização de equipamento de alta tecnologia, onde as variáveis temporais, efêmeras e contagens, não são de fácil manuseio; só é possível com a utilização de sofisticados programas.

A maior parte do tempo empregado nesta dissertação, foi dedicada, direta ou indiretamente, ao processamento, em que se atendia à necessidade de atingir os melhores resultados.

Foram usados programas cedidos ao CPGCG, pela Universidade de Hannover, e implantados pelo Eng. Heiner Lange, da mesma Universidade, com a colaboração de pessoal da UFPr e participantes do projeto.

Cabe ressaltar que todo o processamento com GEODOPV, realizou-se sob o método de arco curto, com relaxação de seis parâmetros orbitais e quatro parâmetros da estação e troposfera. Para efeitos de calibração, os últimos quatro são os mais significativos.

Este capítulo descreve resumidamente, o processamento dos dados Doppler, através dos programas EGMJV e principalmente GEODOPV.

## 4.1 VOTAÇÃO MAJORITÁRIA.

O primeiro processamento a que é submetida a informação de campo, gravada em fita cassette, é a votação majoritária (VM). As transmissões dos satélites vêm afetadas de ruídos e interferências; os dados são tratados numa filtragem, sendo estes a entrada de um programa que realiza a votação majoritária. Os dados são comparados dígito a dígito ou bit a bit, adotando-se como valor correto o mais freqüente.

### 4.1.1 Votação majoritária de dados do CMA-751.

A votação majoritária de dados coletados por receptores CMA-751, foi executada pelo programa EGMJV no sistema HP-1000. As funções deste são basicamente três:

- 1- vota as efemérides operacionais dígito a dígito, sem comparação de caracteres não numéricos.
- 2- acumula as contagens Doppler de intervalos de 4,6 segundos, para intervalos de 30 segundos nominais. Estes são formados por agrupamentos de 6, 7, 6 e 6 intervalos, resultando (para um lapso de 2 minutos) 4 intervalos de 28, 32, 28 e 32 segundos nominais respectivamente.
- 3- rejeita passagens com dados correspondentes a um período inferior a 6 minutos.

A saída do programa é compatível com a entrada do programa PREDOP, cuja saída consta de um sumário das efemérides, qualidade do sinal (sinal ruído) e uma relação das contagens

Doppler. Esta informação é gravada em fita magnética de 9 trilhas no sistema HP-1000 e lida após no sistema DEC-10.

Uma das dificuldades encontradas, foi na leitura das fitas cassettes pré-gravadas no CPGCG com uma frequência de 1600 Hz -pré-gravação que tem por objetivo controlar a velocidade de rotação gravação/leitura, na CMA-749. Destas fitas algumas não foram gravadas satisfatoriamente, o que dificultou a leitura, provocando algumas perdas de passagens.

#### 4.1.2 Votação majoritária de dados do JMR-1.

A votação majoritária de dados coletados pelos receptores JMR-1, foi executada pela fundação IBGE no Rio de Janeiro, pelo pessoal próprio, e fornecido ao CPGCG em fita magnética de 9 trilhas, possibilitando a leitura para a entrada do programa PREDOP.

## 4.2 SISTEMA DE PROGRAMAS GEODOPV.

Na solução geodésica dos dados, usou-se o sistema de programas GEODOPV ( GEODOP versão V), desenvolvido por Jan Kouba, o qual inclui o programa principal GEODOPV e seus programas associados PREDOP, PREPAR, MERGE, NWLFIT, PRERED e POSRED. É fruto do programa GEODOP III e o programa de redução geodinâmica Doppler GERDOP, criado no Canadá pelo Earth Physics Branch of the Canadian Department of Energy Mines and Resources.

#### 4.2.1 Implantação da versão UFPr.

O programa cedido pela UH através do prof. Gunter Seeber, chegou ao CPGCG em abril de 1985, em mãos do Eng. Lange. A versão, em linguagem Fortran 77, não era compatível com o computador DEC-10. Vários meses foram gastos na implantação, tarefa sob a coordenação do Eng. Lange. No mês de setembro do mesmo ano e após verificada pela execução de dados teste, a versão UFPr ficou finalmente executável.

#### 4.2.2 Efemérides precisas.

As efemérides precisas não são disponíveis em tempo real, são fornecidas pela U. S. Defense Mapping Agency (DMA) a usuários de entidades governamentais, em fita magnética, contendo dados discretos (cada 1 minuto) da posição de dois satélites para a época de observação, em coordenadas cartesianas geocêntricas e suas componentes de velocidade. Estes dados foram fornecidos pelo IBGE ao CPGCG com autorização do IAGS (Inter American Agency Service).

#### 4.2.3 Descrição geral do programa GEODOPV.

O propósito dos programas GEODOPV e associados, é processar informações Doppler, coletadas por vários possíveis instrumentos, receptores do sistema NNSS. Entre suas características principais estão:

- processamento em multiestação de até 15 estações, sendo 10 simultâneas;
- relaxamento de até 6 parâmetros orbitais Keplerianos;
- relaxamento de até 4 parâmetros da estação e troposfera;
- modelagem da refração ionosférica de alta ordem;
- melhorias da modelagem de refração troposférica;
- correção de efeitos relativistas;
- pesos de dados Doppler melhorados, incluindo correlação espacial e temporal, para estações observadas simultaneamente.

Uma descrição das funções de cada programa específico se segue:

- PREDOP: processa e edita dados votados dos receptores CMA-722, CMA-751, CMA-761, JMR-1, JMR-1A e dados brutos do MX-1502. Cria coeficientes do polinômio de Chebyshev para representar a órbita, substituindo os dados das efemérides operacionais.
- NWLFIT: cria um arquivo binário da curva ajustada dos coeficientes de Chebyshev, a partir das efemérides precisas.
- MERGE: reúne até 15 estações simples num arquivo de multiestação, ou reúne um ou mais arquivos de efemérides precisas.
- PRERED: lista os programas PREDOP ou MERGE, criando um arquivo binário.
- POSRED: lista e copia as coordenadas do arquivo de saída do programa GEODOP.
- NWLDUM: lista o programa NWLFIT, criando um arquivo binário.



GEODOP: realiza um ajustamento sequencial (passagem a passagem) dos dados de até 15 estações e fornece uma solução de posição das estações, em coordenadas cartesianas geocêntricas e geodésicas; informação da relaxação do receptor, órbita e refração; além da apropriada matriz variância-covariância estimada.

O fluxograma, da figura 18, mostra a rota dos dados através dos programas, usando efemérides operacionais.

Os dados votados, são dados de entrada do programa PREDOP; um arquivo pré-processado binário é obtido. O programa GEODOP usa este para a solução em ponto simples. Vários arquivos binários (para diferentes estações ou períodos) são combinados pelo programa MERGE, com o qual um novo arquivo binário para multiestação é criado. Após isso, o programa GEODOP é usado para obter a solução final de multiestação, ou, criando e editando um arquivo binário para posterior uso.

A figura 11 mostra o fluxograma para o processamento com efemérides precisas.

Este tipo de processamento diverge do anterior a partir da entrada do programa GEODOP, em ponto simples.

O programa NWLFIT é primeiramente usado para criar o polinômio de Chebyshev, obtendo-se as efemérides precisas em forma polinomial. O programa MERGE é usado para substituir os polinômios das efemérides operacionais num arquivo binário, a saída final de MERGE pode ser tratada como anteriormente, ou como entrada, em GEODOP, ou novamente entrada em MERGE para a solução em multiestação.

## Processamento com efemêrides operacionais.

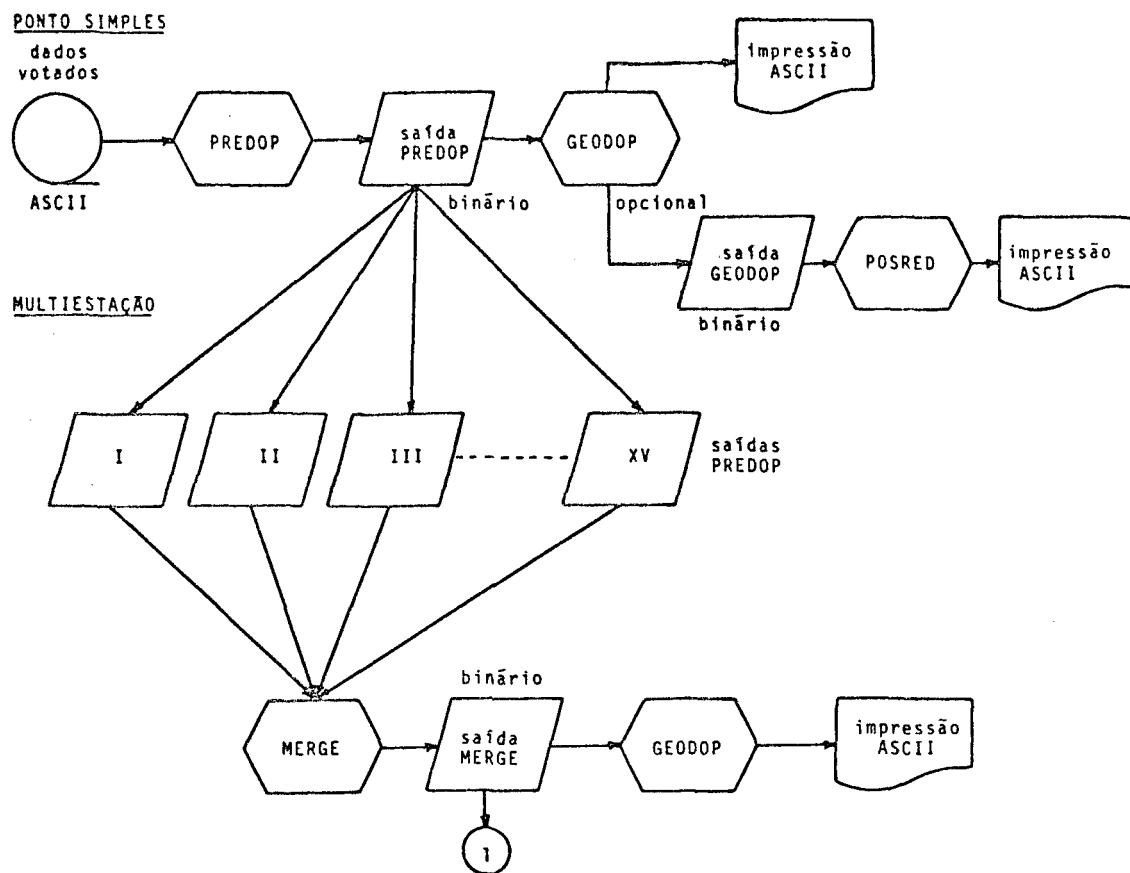
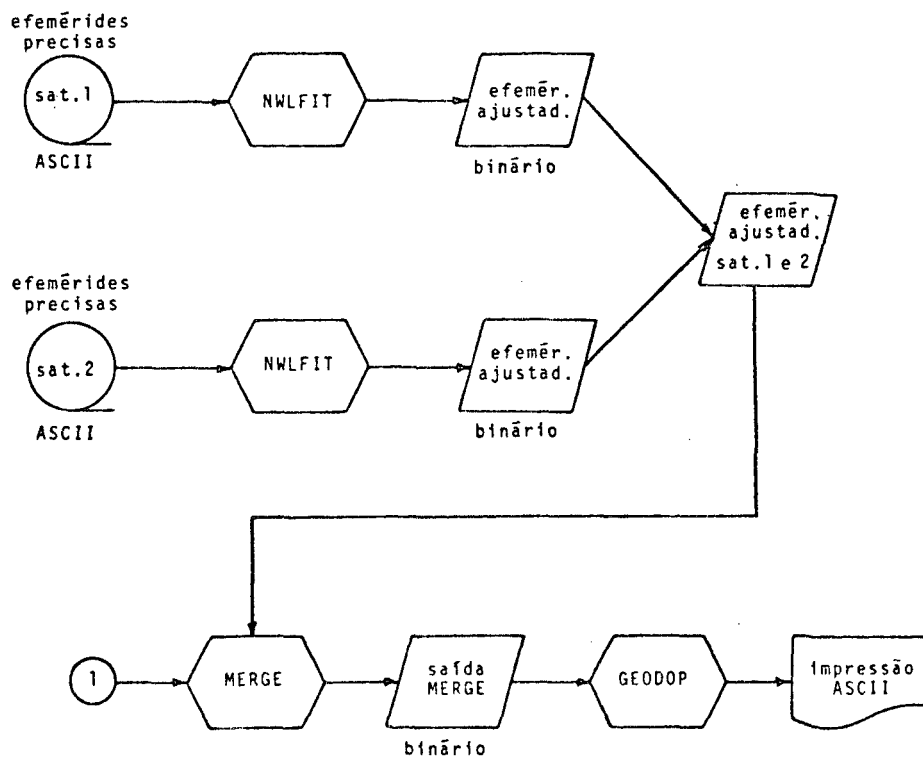


FIGURA 11

## Processamento com efemêrides precisas.



### 4.3 PROCESSAMENTO COM PROGRAMA GEODOPV.

Múltiplas opções nos programas GEODOPV e PREDOP, podem ser especificadas no processamento, aos dados de entrada. Para processamento, em que os resultados pretendem providenciar uma comparação entre diferentes instrumentos, algumas decisões devem ser tomadas nas referidas opções quanto valores aproximados e pesos. Neste trabalho, algumas das opções e pesos usados, foram baseados (por indicação do Eng. Lange) em experiências anteriores de processamentos realizados na UH, e discutidas após várias rodadas teste, atingindo resultados satisfatórios; e em muitos casos usando valores "padrão" dos programas.

#### 4.3.1 Opções usadas no programa PREDOP.

No programa PREDOP, pesos e valores aproximados, geralmente não são problemas. São necessários valores aproximados para a posição da estação, os quais são usados para teste estatístico dos dados. Estes valores não devem ser necessariamente de grande precisão, o peso padrão é 1 quilômetro.

Algumas das opções mais significativas são:

- a- ordem do polinômio que representa o campo da gravidade, usando no polinômio de Chebyshev, para a aproximação das efemérides operacionais: valor padrão (=10).
- b- passagens com menos de 10 contagens Doppler são rejeitadas; isto devido ao fato que tais passagens geralmente são rejei

tadas em GEODOP, e não contribuem grandemente à solução final.

- c- passagens que não atingem 10 graus de elevação e observações sob 5 graus em altura, são rejeitadas, eliminando o problema de incerteza na correção da refração troposférica em GEODOP.
- d- contagens Doppler com baixa potência de sinal (menor que -140 dbm), são rejeitadas.
- e- podaçoão não ativada (padrão=ativada) da simetria das contagens em relação ao ponto de aproximação máxima.

#### 4.3.2 Opções usadas no programa GEODOPV.

As seguintes foram as opções mais importantes usadas no programa GEODOPV.

- a- relaxamento de seis parâmetros orbitais Keplerianos.
- b- relaxamento de quatro parâmetros da estação e troposfera:
  - $\Delta f_0$ : desvio de frequência do receptor
  - $\delta$  : retardo do receptor
  - $\dot{f}_0$ : deriva de curto período do receptor
  - dk: sobrecorreção da correção troposférica nominal
- c- modelo de refração troposférica: padrão (de Black's)
- d- correção de refração ionosférica de alta ordem, não é aplicada. Visto que, segundo Kouba esta correção causa ruídos nos dados dos receptores CMA-751 /02/. Nos dados dos JMR-1 esta correção não é aplicável, em razão que as contagens de ambos canais, corrigidas da refração ionosférica de primei-

- ra ordem, não são registradas. Estes tipos de dados são necessários para a aplicação da correção de terceira ordem.
- e- para solução em multiestação, no mínimo duas estações devem observar uma passagem para ser aceita, devido a que a contribuição é pequena na solução final de uma passagem em ponto simples.
  - f- são rejeitadas passagens que atingem menos de 10 graus de elevação e não são aceitos dados para observações abaixo 7,5 graus de elevação, para eliminar problemas de refração troposférica.
  - g- elipsóide de referência: WGS-72. Para a calibração esta opção não é importante, já que a análise é realizada num sistema local.

No programa foram usados os seguintes valores aproximados e pesos a priori:

- a- para as efemérides operacionais, considerou-se pesos (1 sigma) correspondentes aos valores de 9, 10, 9, 9, 9 e 9 metros, para cada um dos 6 elementos da órbita Kepleriana: semi eixo maior ( $a$ ), movimento médio ( $n$ ), inclinação ( $i$ ), ascensão reta do nodo ascendente ( $\Omega$ ), excentricidade ( $e$ ) e argumento do perigeu ( $\omega$ ), respectivamente.
- b- usando-se efemérides precisas, considerou-se valores (1 sigma) de 1, 2, 1, 1, 1 e 1 metros, para os respectivos pesos da órbita, na mesma ordem supra.
- e- modelo de correlação para as contagens Doppler: de pesos idênticos e sem correlação.
- f- nas rodadas finais, os desvios padrões (1 sigma) da posição de cada estação, foram fixados em 5 metros. O valor padrão

é de 25 metros. As coordenadas aproximadas devem ser precisas dentro de 1 sigma, se possível.

- g- o desvio padrão (1 sigma) da contribuição do ruído do satélite por cada 30 segundos ( $\sigma_s$ ), comum a todas as estações, fixou-se em 1 centímetro, sendo avaliado de melhor maneira a partir da análise de correlação, no processamento em multiestação (veja capítulo V).
- h- os valores usados nas primeiras rodadas, para os sigmas da contribuição do receptor, devido à fase ( $\sigma_p$ ) e variação de distância ( $\sigma_{rr}$ ), para uma observação de 30 segundos, foi de 2 e 15 centímetros, respectivamente (valores padrões). A estimação mais precisa destes valores, em sucessivas rodadas é efetuada por meio da análise de correlação em ponto simples.
- i- o desvio e a deriva de frequência para cada receptor, foram estimados inicialmente como zeros (valores padrões). O GEODOP calcula os valores destes parâmetros, a partir de valores aproximados, para a primeira passagem. Estes são corrigidos em rodadas sucessivas.
- j- na maioria das rodadas, um retardo do receptor de 600 microsegundos foi usado (valor padrão), com peso de 10 microsegundos. Estes parecem ser os mais representativos para os receptores, segundo /02/. Kouba afirma que os valores são podem ser obtidos com completa confiança, por comparação do relógio do instrumento com um relógio de césio referido a TUC. Contudo, os valores estimados pelo GEODOP, pouco variam dos valores aproximados.
- k- para o valor aproximado da parcela de refração troposférica (sobrecorreção da correção nominal), usou-se o valor padrão: 10 % .

1- como valor aproximado dos desvios de frequência de cada satélite, usou-se os valores calculados a partir das listagens de dados votados de um receptor qualquer CMA-751 (fase pré-calibração). Estes coincidiram completamente com os calculados em GEODOP, não existindo diferenças. Com isto, se dispensa as circulares do U. S. Naval Laboratory, contendo tais valores.

## CAPÍTULO V

### 5 RESULTADOS E ANÁLISE.

Este capítulo apresenta os resultados obtidos do processamento dos dados e analisa alguns aspectos destes. Visto o grande volume de dados disponíveis e opções existentes, só uma parte destes são considerados de relativa importância e discutidos aqui.

#### 5.1 VOLUME DE DADOS.

Um dos fatores de importância no uso de receptores geodésicos Doppler, é a quantidade de dados que estes aparelhos podem obter. É bem conhecido que a precisão de qualquer tipo de medição, incluindo as Doppler, varia proporcionalmente à raiz quadrada do número de observações. Contudo, não é o caso de determinação da posição em coordenadas referidas ao sistema global, onde estas estão limitadas pela precisão das efemérides; é válido só para a determinação de linhas bases, que são independentes do sistema de coordenadas.

Quanto mais observações um instrumento possa obter num certo período de tempo, melhor a precisão do resultado (se não existirem tendências sistemáticas). Ou alternativamente, se



dada precisão é necessária, e um instrumento acumula observações mais rapidamente que outros, em menor tempo atenderá a precisão desejada.

#### 5.1.1 Passagens rastreadas e aceitas no programa PREDOP.

A tabela 5, apresenta a estatística de rejeição no programa PREDOP, para todos os instrumentos.

Esta tabela mostra uma certa diferença de comportamento no processamento no programa PREDOP, do receptor C1 (CMA-751 S/N 102). O alto índice de rejeição é devido principalmente a insuficiência de contagens Doppler, ou havendo contagens, são de baixa potência. O número de passagens rejeitadas, devido ao satélite não ter alcançado 10 graus de elevação, é aceitável e a passagem rejeitada por erro da votação majoritária (parâmetro ilegal) ou sincronia após a metade da passagem, são razoáveis. Comparando o receptor C1 com o conjunto, nota-se claramente que as rejeições por insuficiência de contagens Doppler, se deve a sinais de frequência Doppler fracamente registrados.

#### 5.1.2 Passagens processadas e aceitas no programa GEODOPV.

As tabelas 6 e 7, mostram a estatística das contagens Doppler e passagens, para dois tipos de soluções (efemérides operacionais e precisas), do processamento com o programa

TABELA 5

Estatística PREDOP.

RECEPTOR	Passagens		rejeitadas devido a:				total rejeit.	
	rastre- adas	acei- tas	elevaç. insuf.	contag. insuf.	sincron. tardio	parâm. ilegal	quant.	%
C1	40	28	4	7		1	12	30
C2	83	75	6	2			8	10
C3	44	39	1	1	3		5	13
C4	79	73	4	2			6	8
J1	28	27	1				1	4
J2	32	29	3				3	4
J3	40	39	4	2			6	15

GEODOPV, e três combinações de multiestação.

Processou-se a totalidade dos receptores em multiestação e, considerando algumas expressivas diferenças entre os dois tipos de aparelhos (maiores detalhes em 5.2.2), decidiu-se separar o processamento em dois grupos de receptores da mesma classe, JMRs e CMAs.

No processamento de sete estações em multiestação, o receptor C1, é o que possui maior porcentagem de rejeição (25 e 33 %, com efemérides operacionais e precisas, respectivamente), e nota-se deficiência da média de contagens Doppler por passagens, em relação aos outros receptores.

Das multiestações separadas nos grupos de CMAs e JMRs, este último grupo possui maior índice de rejeição média que o primeiro, isto é parcialmente explicável. Devido à condição

TABELA 6

Estatística GEODOP em multiestação  
com efemérides operacionais.

	Passagens processadas	TODOS OS RECEPTORES					SÕ OS CMAs					SÕ OS JMRS				
RECEPTOR		Passagens			cont. Dopp.	cont./ pass.	Passagens			cont. Dopp.	cont./ pass.	Passagens			cont. Dopp.	cont./ pass.
		acei- tas	rejeitadas				acei- tas	rejeitadas				acei- tas	rejeitadas			
			quant.	%				quant.	%				quant.	%		
C1	28	21	7	25	328	15,6	22	6	21	335	15,2					
C2	75	68	7	9	1500	22,1	65	10	13	1447	22,3					
C3	39	38	1	3	749	19,7	38	1	3	747	19,7					
C4	73	70	3	4	1410	20,1	69	4	5	1414	20,5					
J1	27	26	1	4	468	18,0						21	6	22	389	18,5
J2	29	26	3	10	543	20,9						16	13	45	348	21,8
J3	34	32	1	3	606	18,9						25	9	26	489	19,6

TABELA 7

Estatística GEODOP em multiestação  
com efemérides precisas.

	Passagens processadas	TODOS OS RECEPTORES					SÕ OS CMAs					SÕ OS JMRs				
RECEPTOR		Passagens			cont. Dopp.	cont./ pass.	Passagens			cont. Dopp.	cont./ pass.	Passagens			cont. Dopp.	cont./ pass.
		acei- tas	rejeitadas				acei- tas	rejeitadas				acei- tas	rejeitadas			
			quant.	%				quant.	%				quant.	%		
C1	12	8	4	33	94	11,8	9	3	25	101	12,6					
C2	29	24	5	17	510	21,3	24	5	17	513	21,4					
C3	15	13	2	13	233	17,9	13	2	13	234	18,0					
C4	28	24	4	14	460	19,2	24	4	14	481	20,0					
J1	9	8	1	11	143	17,9						7	2	22	128	16,0
J2	12	10	2	17	198	19,8						7	5	42	144	14,4
J3	16	13	3	19	227	17,5						12	4	25	221	17,0

em GEODOPV (para multiestação), em que uma passagem para ser aceita, deve ser observada simultaneamente, ao menos por duas estações. Isto pode ser apreciado na figura 12, que esquematiza as passagens comuns em GEODOPV, para todas as estações em multiestação. Os JMRs sō tem dados comuns entre as passagens 31 e 63.

Os círculos marcados em escuro (figura 12), indicam efemérides precisas de tais passagens (satélites números 11 e 20).

## 5.2 PRECISÕES ESTIMADAS DOS RECEPTORES.

É obvio que em comparações de qualquer tipo de instrumentos, existirão diferenças de precisão das medições, entre estes. A avaliação destas precisões, também atende à razão de determinar valores necessários para os pesos das observações, em qualquer ajustamento que inclua estes dados. Valores pessimistas dos pesos, resultam em valores pessimistas para a matriz variância-covariância dos resultados, no caso inverso pode ocorrer grande quantidade de rejeições de dados (devido a testes estatísticos) em GEODOPV.

A estimativa da precisão não pode ser considerada rigorosa, pelo emprego de um grande número de observações simultâneas para todos os instrumentos, se assume que as estimativas, são válidas, ao menos relativamente entre elas, e não em sentido absoluto.

### 5.2.1 Precisão da variação de distância.

Deve-se esclarecer que a chamada "medida de precisão" do receptor,  $\bar{\sigma}_{rr}$ , é o desvio padrão da variação de distância medida ( $\sigma_{rr}$ ), sobre um intervalo (convencional em GEODOPV) de 30 segundos. Basicamente, inclui o erro de ambas as contagens Doppler e a medição do tempo, para a acumulação de contagens,  $\bar{\sigma}_{rr}$  é dado em unidades de contagens Doppler ou centímetros em cada 30 segundos.

Os únicos cálculos externos ao programa GEODOPV, são os das estimativas das precisões (1 sigma), da contribuição do ruído do satélite ( $\sigma_s$ ), da fase ( $\sigma_p$ ) e da variação de distância ( $\sigma_{rr}$ ). Estes cálculos são realizados iterativamente, valendo-se da análise de correlação, até atingir, o sigma a posteriori de peso unitário ( $\hat{\sigma}_0$ ), um valor o mais próximo possível de 1 (sigma a priori  $\sigma_0$  igual a 1), e as estimativas calculadas diferirem insignificamente das aproximadas.

Para o cálculo, se examinam os coeficientes de correlação entre contagens Doppler adjacentes, em observações acumuladas de número igual ou superior a 10, da listagem de saída em ponto simples do programa GEODOPV. Destes elementos fora da diagonal, calcula-se a média das correlações ( $\rho$ ).

Seguindo o algoritmo, apresentado em /14/ (página 59), calcula-se  $\sigma_p$  e  $\sigma_{rr}$ , para serem usados como valores aproximados para a rodada seguinte. A tabela 8 mostra os valores finais calculados para cada receptor. Percebe-se a grande diferença de precisão média ( $\sigma_{rr}$ ) entre os dois grupos de receptores (27,0 centímetros para os JMRs e 2,8 centímetros para os CMAs).



Isto indica claramente que estes JMRs, possuem incorporada uma imprecisão extremamente alta (levando em consideração que o valor padrão em GEODOPV é de 5,0 cm, valor estimado por Kouba como representativo para os receptores), provavelmente devido a erro nas contagens e/ou erro na medição de tempo.

### 5.2.2 Determinação do ruído comum às estações.

Uma complicação inserida às determinações supra, é o problema do ruído comum (ou do satélite)  $\sigma_s$ . Assume-se que o oscilador do satélite é a provável fonte do ruído, provocando incrementos nos resíduos para todos os instrumentos, em observação simultânea.

Kouba, na versão GEODOPV, modificou a entrada permitindo uma estimativa de  $\sigma_s$ , a partir da listagem de saída em multiestação.

Similar ao cálculo de  $\sigma_p$  e  $\sigma_{rr}$ , calcula-se a média ( $\rho_s$ ), dos elementos diagonais da matriz de correlação, comum a todas as estações durante um particular intervalo de observação, segundo o algoritmo apresentado na página 60 de /14/.  $\sigma_s$  resulta em centímetros para cada 30 segundos.

Estes cálculos das estimativas de precisões, foram realizados durante o processamento com efemérides operacionais, em virtude que na época ainda não se encontrava implantado o programa NWLFIT, podendo o cálculo também ser feito com dados das efemérides precisas.

Baseados em experiências transmitidas pelo Eng. Lange, espera-se que  $\sigma_s$  tome valores entre 1 e 2 centímetros. Visto a diferença de precisão entre os dois tipos de instrumentos,



o autor decidiu neste estágio, processar também em multiestação, separadamente os CMAs e JMRs. Evidenciando, de certa maneira, a incompatibilidade dos dois grupos, já que em /14/, para o cálculo do ruído comum, se menciona, como nota importante que: " $\sigma_i^2$  e  $\rho_i$ ".

Realizados estes processamentos, obteve-se os seguintes valores para  $\sigma_s$ :

todos os receptores :	$\sigma_s$	=	15	centímetros/30 segundos
sō CMAs :	$\sigma_s$	=	2	" " "
sō JMRs :	$\sigma_s$	=	25	" " "

Mais investigações deste problema são necessárias para determinar, a fonte e sua variação com o satélite e os valores máximo e mínimo possíveis que pode tomar. Obviamente este ruído deve ser levado em consideração, em processamento Doppler, afim de obter a melhor estimação da matriz variância-covariância.

### 5.3 PARÂMETROS DOS RECEPTORES.

Três são os parâmetros de relaxação da estação, usados no processamento em arco curto: retardo ( $\delta$ ), desvio de frequência ( $\Delta f$ ) e deriva do receptor ( $\dot{f}$ ). Destes, o menos confiável é o retardo, pelas razões expostas em seção 4.3.2.

A deriva de frequência do oscilador de um receptor, é a mais importante quantidade a ser determinada, sua influência é a que mais pesa (dos três parâmetros do receptor) na precisão da redução dos dados. Isto constatou-se durante todo o processamento.

Em geral, um oscilador mais estável permitirá medir com maior precisão o tempo e as contagens Doppler. Assume-se que a deriva é linear durante uma passagem e não muito grande em magnitude. Em caso contrário, se é errático ou muda de uma passagem para outra, introduzirá ruídos imodeláveis no oscilador. Idealmente deve-se observar a deriva de curto período (dentro de uma passagem), referida a intervalos sobre 100 segundos até aproximadamente 15 minutos. Mas isso geralmente não é possível. Em lugar disso, a deriva de longo período dos instrumentos (maior que uma passagem), pode ser checada para variações, providenciando alguma indicação da estabilidade de curto período. O valor pode ser obtido da diferença entre o primeiro e último desvio de frequência, calculada para cada instrumento. Note-se que para obter a variação diária, deve-se assumir que a deriva é constante, durante uma instalação. O programa GEODOPV plota o desvio de frequência (off-set), afirmando este pressuposto, conforme gráficos das figuras 13a a 13g (apêndice).

A tabela 9 mostra os valores dos três parâmetros do receptor e seus respectivos desvios padrões, percebe-se que estes são notavelmente maiores nos JMRS que nos CMAs, com exceção do sigma do desvio de frequência do receptor C1 (CMA-751 S/N 102), mostrando mais uma vez uma diferença pessimista em relação aos demais CMAs, indicando alguma instabilidade no oscilador. No-

TABELA 9

Parâmetros finais dos receptores.

RECEPTOR	RETARDO( $\mu$ s)		DESVIO		DERIVA <sup>3</sup>	
	$\delta$	$\sigma_\delta$	$\Delta f$ <sup>1</sup>	$\sigma_{\Delta f}$ <sup>2</sup>	$\dot{f}$	$\sigma_{\dot{f}}$
C1	585	15	-16,33	48	3	2
C2	585	5	-7,25	4	1	1
C3	630	6	-7,29	8	1	1
C4	590	5	-2,77	4	4	1
J1	600	29	-5,33	22	-7	5
J2	600	21	-112,91	7	4	4
J3	600	20	3,43	13	9	4

(1) unidades em Hz/400 Hz

(2) unidades em Hz/minuto

(3) unidades em partes em  $10^{10}$ / dia

ta-se também, que C1 possui os maiores sigmas de retardo e deriva, de entre os CMAs, comprovando sua deficiência relativa.

Considerando agora, somente os desvios padrões da deriva: a média dos JMRs ( $\sim 4,3$  partes em  $10^{10}$ /dia) e os CMAs ( $\sim 1,3$  partes em  $10^{10}$ /dia), pode-se dizer que comparativamente os JMRs são altamente instáveis.

#### 5.4 PRECISÃO DAS COORDENADAS.

Os resultados finais obtidos da solução com o programa

GEODOPV, são as coordenadas finais reduzidas ao pilar central do observatório do CPGCG, e suas precisões internas. Por tanto podem ser diretamente comparadas em relação à média ponderada (segundo a variância) de cada solução. A análise das coordenadas efetuou-se num sistema local destrôgiro, com o eixo Y positivo segundo o meridiano local, o eixo X positivo em sentido Leste e, Z tornando o sistema destrôgiro.

As tabelas 10a e 10b, mostram os desvios padrões para a latitude, longitude e altitude, de cada solução em multiestação de GEODOPV, com efemérides operacionais e precisas.

Os desvios padrões dos receptores CMAs (para as três coordenadas), variam entre 1,20 e 1,47 metros com efemérides operacionais, e nos JMRs variam entre 1,62 e 3,12 metros. Ao processar com efemérides precisas, os desvios padrões dos CMAs diminuem a menos da metade (entre 0,41 e 0,58 metros) e, peculiarmente, os desvios padrões dos JMRs variam em pouca quantidade. Quando processados sem os CMAs (entre 1,70 e 3,38 metros), e quando processados em conjunto com os CMAs, aumentam consideravelmente (entre 1,64 e 3,45 metros). Fica claro que mesmo quando a contribuição orbital diminui, com a utilização de efemérides precisas, no ajustamento de GEODOPV, se reflete a contribuição da parcela dos erros terrestres, nos aparelhos JMRs.

As figuras 14a e 14b, esquematizam a solução final planimétrica e altimétrica, no sistema local. Das três combinações por agrupamento de receptores, em multiestação com efemérides operacionais e precisas, podendo-se chamar estes gráficos de "pontaria" dos receptores.

TABELA 10a

Desvios padrões finais em GEODOP (metros).  
Multiestação com efemérides operacionais.

	todos os receptores			sō CMAs			sō JMRS		
RECEPTOR	$\sigma_\phi$	$\sigma_\lambda$	$\sigma_h$	$\sigma_\phi$	$\sigma_\lambda$	$\sigma_h$	$\sigma_\phi$	$\sigma_\lambda$	$\sigma_h$
C1	1,34	1,20	1,27	1,47	1,27	1,41			
C2	"	"	"	1,46	1,26	"			
C3	"	"	"	"	1,27	"			
C4	"	"	"	"	1,26	"			
J1	1,98	2,39	1,91				2,56	3,12	2,65
J2	1,78	1,96	1,71				2,57	3,10	2,65
J3	1,70	2,00	1,62				2,41	2,97	2,49

TABELA 10b

Desvios padrões finais em Geodop (metros).  
Multiestação com efemérides precisas.

	todos os receptores			sō CMAs			sō JMRS		
RECEPTOR	$\sigma_\phi$	$\sigma_\lambda$	$\sigma_h$	$\sigma_\phi$	$\sigma_\lambda$	$\sigma_h$	$\sigma_\phi$	$\sigma_\lambda$	$\sigma_h$
C1	0,55	0,48	0,48	0,58	0,50	0,48			
C2	0,53	0,44	0,41	0,56	0,45	0,45			
C3	0,54	0,46	0,44	0,57	0,48	0,47			
C4	0,53	0,44	0,42	0,56	0,46	0,45			
J1	2,36	3,45	2,24				2,30	3,38	2,32
J2	2,17	2,55	2,08				2,17	2,64	1,99
J3	1,78	2,77	1,64				1,70	2,66	1,57

FIGURA 14a

Solução em multiestação com efemêrides operacionais.

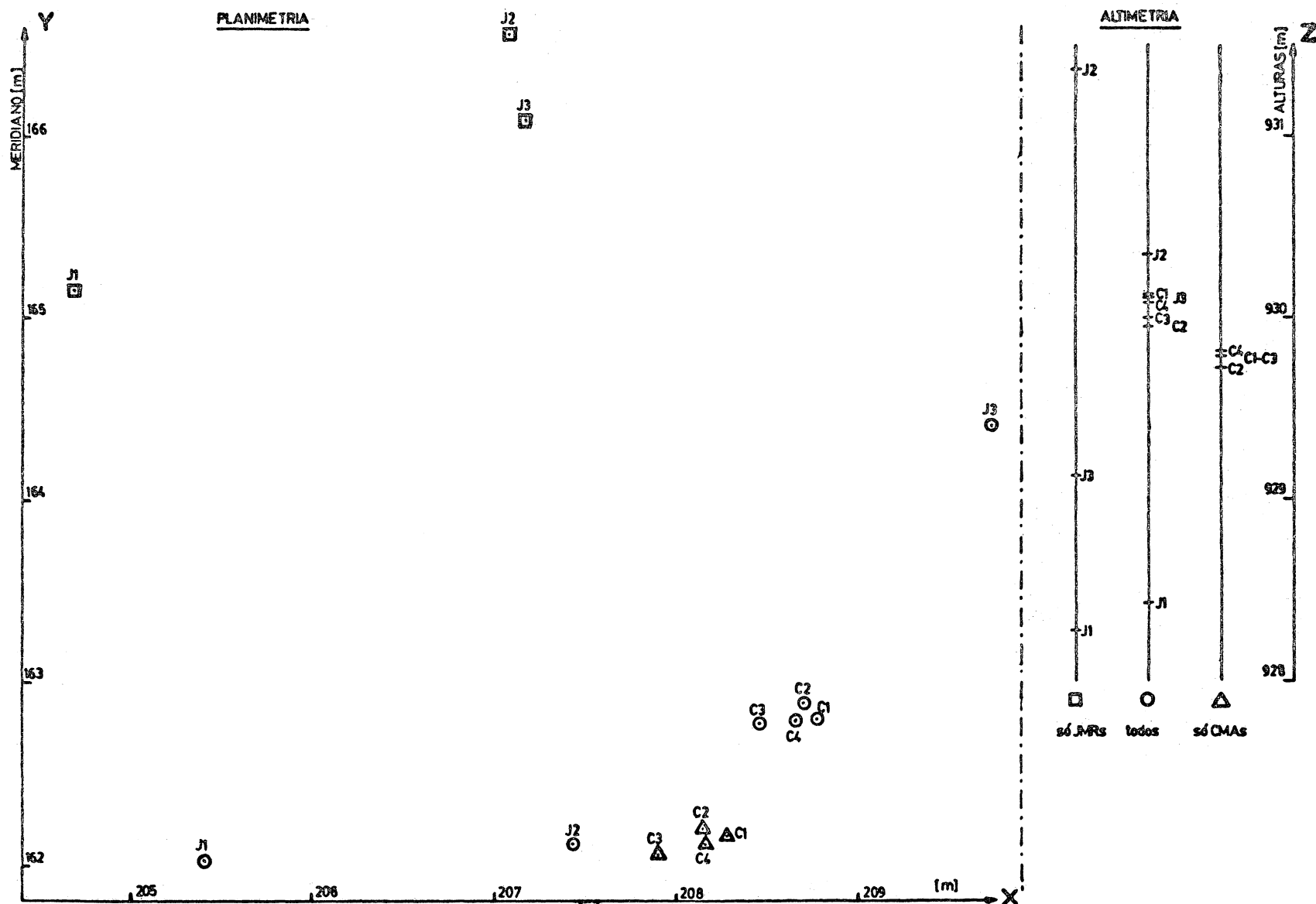
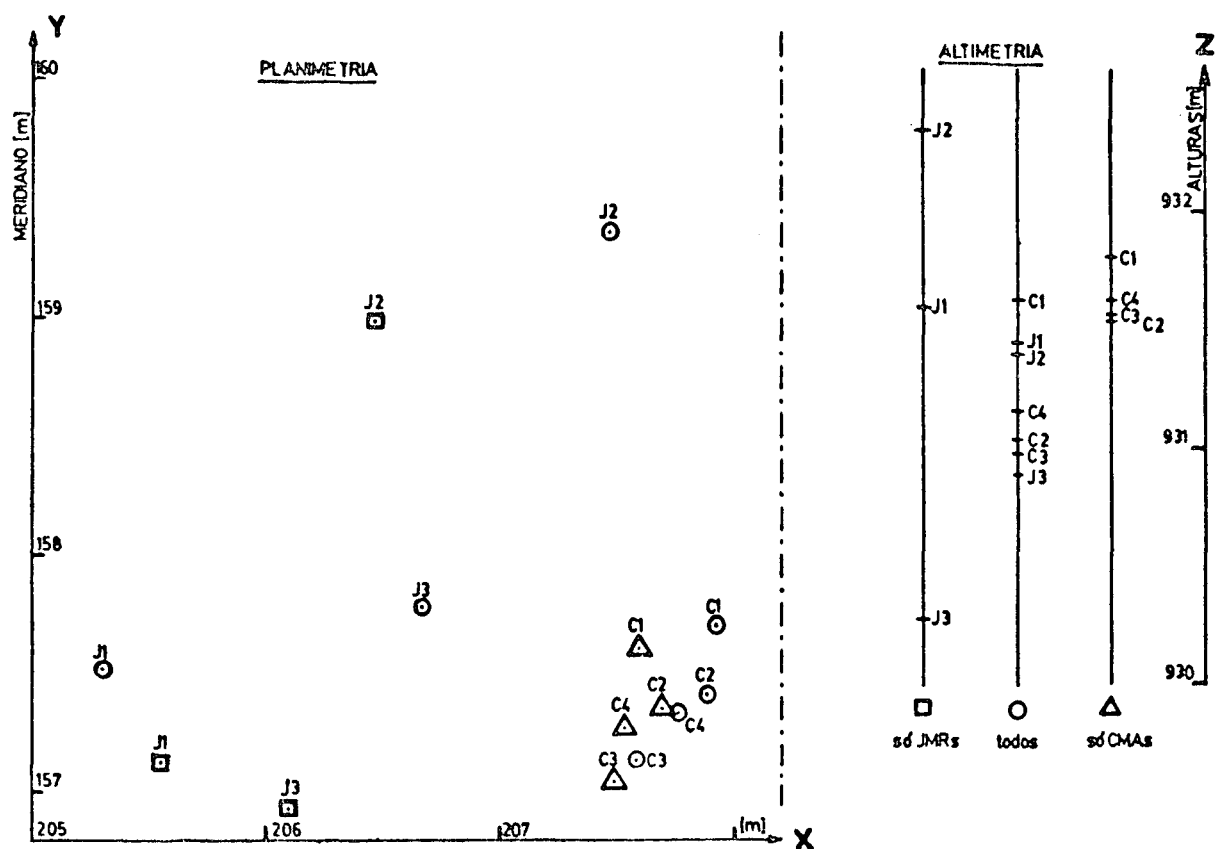


FIGURA 14b

Solução em multiestação com efemérides precisas.



Uma inspeção visual dos gráficos mostra, em geral, pouca dispersão para os CMAs, em relação aos JMRs.

Nota-se uma grande divergência plano-altimétrica, entre as soluções de CMAs e JMRs separadamente, tanto em dispersão quanto na localização média de cada solução. Quando processados os sete receptores juntos, percebe-se pouca variação da dispersão separadamente para os CMAs e JMRs e, o conjunto dos CMAs é deslocado da sua posição particular.

As tabelas 11a e 11b, apresentam os resíduos das coordenadas referidas ao ponto central do observatório, em solução de multiestação, com efemérides operacionais e precisas, respectivamente. Estas tabelas representam o enfoque qualitativo das figuras anteriores.

Nos processamentos em que se inclui receptores JMRs, ao usar efemérides precisas, os desvios padrões, em alguns casos, tendem a diminuir. Mas em geral mantêm-se na ordem da unidade de metro. A situação é diferente ao comparar o processamento dos CMAs, os desvios padrões são próximos do decímetro, quando usadas as efemérides precisas, os resíduos em latitude e altitude aumentam (de 0,06 para 0,24 e de 0,04 para 0,12 metros respectivamente) e os resíduos em longitude diminuem (de 0,16 para 0,08 metros).

Pode-se concluir para estes valores que, quando empregadas efemérides precisas, a tendência é piorar os desvios padrões. Implicando que, para posicionamento relativo (translocação), pode-se esperar melhores resultados, ou ao menos iguais, com o uso de efemérides operacionais.



TABELA 11a

Resíduos da redução ao ponto central (metros).  
 Multiestação com efemérides operacionais.

RECEPTOR	todos os receptores			sō CMAs			sō JMRs		
	$V_{\phi}$	$V_{\lambda}$	$V_h$	$V_{\phi}$	$V_{\lambda}$	$V_h$	$V_{\phi}$	$V_{\lambda}$	$V_h$
C1	0,06	0,31	0,17	-0,02	0,15	0,01			
C2	-0,02	0,23	0,00	-0,07	0,04	-0,06			
C3	0,08	-0,01	0,04	0,08	-0,23	0,01			
C4	0,06	0,19	0,13	0,01	0,03	0,03			
J1	0,83	-3,07	-1,54				0,78	-4,68	-1,31
J2	0,75	-1,04	0,40				-0,63	0,77	1,78
J3	-1,55	1,26	0,16				-0,16	0,86	0,46
desvio padrão	0,78	1,39	0,65	0,06	0,16	0,04	0,72	1,41	1,60

TABELA 11b

Resíduos da redução ao ponto central (metros).  
 Multiestação com efemérides precisas.

RECEPTOR	todos os receptores			sō CMAs			sō JMRs		
	$V_{\phi}$	$V_{\lambda}$	$V_h$	$V_{\phi}$	$V_{\lambda}$	$V_h$	$V_{\phi}$	$V_{\lambda}$	$V_h$
C1	-0,27	0,31	0,45	-0,29	0,02	0,18			
C2	0,02	0,27	-0,14	-0,03	0,11	-0,09			
C3	0,30	-0,03	-0,20	0,28	-0,08	-0,06			
C4	0,10	0,14	-0,02	0,05	-0,04	0,00			
J1	-0,09	-2,31	0,27				0,44	-0,55	0,42
J2	-1,93	-0,14	0,22				-1,43	0,36	1,16
J3	-0,35	-0,95	-0,29				0,64	0,00	-0,90
desvio padrão	0,82	1,04	0,28	0,24	0,08	0,12	1,15	0,46	1,08

Isto é explicável pelos fatos de dispôr de maior número de observações, com efemérides operacionais; e em translocação, a influência orbital tende a ser igual para todas as estações (erros sistemáticos aproximadamente iguais).

## CAPÍTULO VI

### 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

Como se enfatizou anteriormente, os resultados específicos obtidos, não podem ser generalizados para outros instrumentos da mesma classe, que não os considerados neste trabalho; especialmente devido às diferenças existentes entre eles.

Deve-se levar em consideração, que os receptores participantes vieram de instituições de diferente natureza. Os receptores JMRs, são de propriedade do IBGE, que os submete constantemente a intensa atividade, devido a demanda de trabalho. Os CMAs são propriedade de universidades, portanto, submetidos normalmente a menor carga de trabalho.

Fazendo-se uma recompilação dos itens mais significativos do capítulo V, pode-se concluir que:

a- entre os receptores CMAs, o receptor C1 (CMA-751 S/N 102), apresentou na estatística de rejeição do programa PREDOP (tabela 5), alto índice de rejeição devido a contagens insuficientes. Provavelmente, a fonte deste erro é o próprio receptor, visto que outros receptores da mesma classe, não apresentaram este problema. O mesmo se reflete no programa GEODOPV (tabelas 6 e 7), em que este receptor possui a menor média de contagens por passagem. Apesar disso, a precisão

deste receptor, no posicionamento relativo, não é prejudicada; como se confirma nos itens a seguir;

- b- a precisão estimada dos receptores ( $\sigma_{rr}$ ), para os receptores CMAs, é de valores aceitáveis no programa GEODOPV. Nos receptores JMRs, esta estimativa é substancialmente maior, ou de menor precisão, sendo muito maior que o valor padrão (5 cm) de entrada no programa. É possível se concluir que, a baixa precisão relativa dos JMRs (27 cm), não é esperada para este tipo de receptores;
- c- os desvios padrão da estimativa do retardo dos receptores ( $\sigma_\delta$ ), são relativamente baixos para os CMAs ( $\sim 6 \mu s$ ), considerando que o valor padrão no programa GEODOPV é de  $10 \mu s$ , este desvio padrão é um pouco maior para o receptor C1 ( $15 \mu s$ ). Com os receptores JMRs não acontece o mesmo, os desvios padrão são consideravelmente altos ( $\sim 23 \mu s$ ), refletindo as variações de curto período;
- d- os desvios padrão da estimativa do desvio de frequência dos receptores ( $\sigma_{\Delta f}$ ), são comparativamente altos para os receptores C1 (CMA-751 S/N 102), J1 (JMR-1 S/N 1213) e J3 (JMR-1 S/N 1352), com valores de 48, 22 e 13 Hz/400 Hz respectivamente, a média dos demais receptores é  $\sim 6$  Hz/400 Hz, indicando uma resolução deficiente da frequência local, para os três receptores mencionados;
- e- os desvios padrão da estimativa da deriva de frequência dos receptores ( $\sigma_{\dot{f}}$ ), são maiores para os JMRs ( $\sim 4,3$  partes em  $10^{10}$ /dia) que para os CMAs ( $\sim 1,3$  partes em  $10^{10}$ /dia), indicando instabilidade relativa do oscilador terrestre para os JMRs. Segundo o exposto nas seções 3.3.3 e 4.3.3, já se esperava uma certa diferença de estabilidade entre os osciladores dos CMAs e JMRs;

f- a precisão interna, no ajustamento do programa GEODOPV, devido aos fatos mencionados nos itens anteriores, demonstra diferenças entre receptores CMAs e JMRs, resultando em desvios padrão pessimistas para os JMRs (tabelas 10a e 10b);

atê este ponto, qualquer conclusão é referente a valores obtidos de processamento ou cálculo, que eventualmente, poderiam ser deduzidos não necessariamente a partir da fase de calibração. Com a disponibilidade de uma rede de calibração, os resultados finais (coordenadas) podem ser diretamente comparados e, neste caso, corroboram-se as conclusões anteriores.

Com isto, e baseados nas figuras 14a e 14b, e nas tabelas 11a e 11b, pode-se apresentar alguma conclusão prática, em relação à precisão do posicionamento relativo (excluindo diferenças de tendenciosidade, devido a influências orbitais, atmosféricas ou outras tendenciosidades que não sejam próprias dos receptores);

g- entre os receptores CMAs e JMRs, existem significativas diferenças;

h- os receptores CMAs são insignificamente diferentes entre eles, e consistentes dentro de uma precisão (1 sigma) em torno de:

~0,10 metros com efemérides operacionais e,  
~0,15 metros com efemérides precisas (\*)

(\*) para o mesmo período de observação que com efemérides operacionais.

i- os receptores JMRs, são insignificamente diferentes entre eles, e consistentes dentro de uma precisão (1 sigma) em torno de:

~1,20 metros com efemérides operacionais e,  
~0,90 metros com efemérides precisas;

j- considerando, uma precisão requerida de poucos centímetros, o trabalho conjunto destes receptores, CMAs e JMRs, não conduz a um resultado muito satisfatório. Portanto, sob esta condição, os receptores CMAs são de alta confiabilidade e os receptores JMRs são de baixa confiabilidade.

Finalmente, pode-se propôr alguma recomendação de importância relativa:

-em ajustamentos, que se inclua informação de posição, a partir de dados coletados pelos receptores considerados neste trabalho, recomenda-se que os pesos pré-atribuídos, sejam ponderados segundo os valores apresentados nos itens h e i, deste capítulo.

## APÉNDICE

FIGURA 13a Desvio de frequência receptor C1, CMA-751 S/N 102

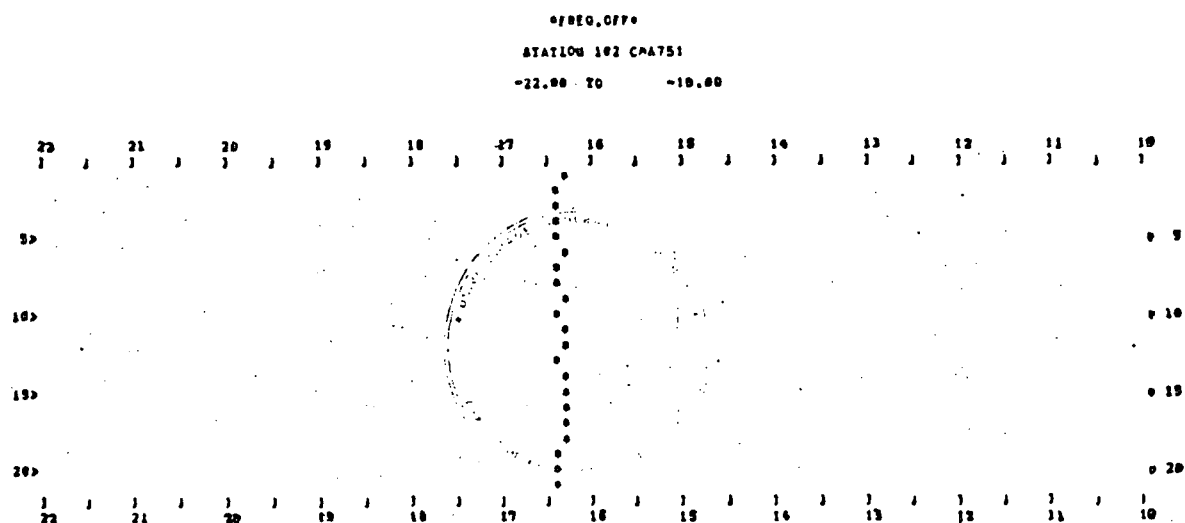


FIGURA 13b Desvio de frequência receptor C2, CMA-761 S/N 104

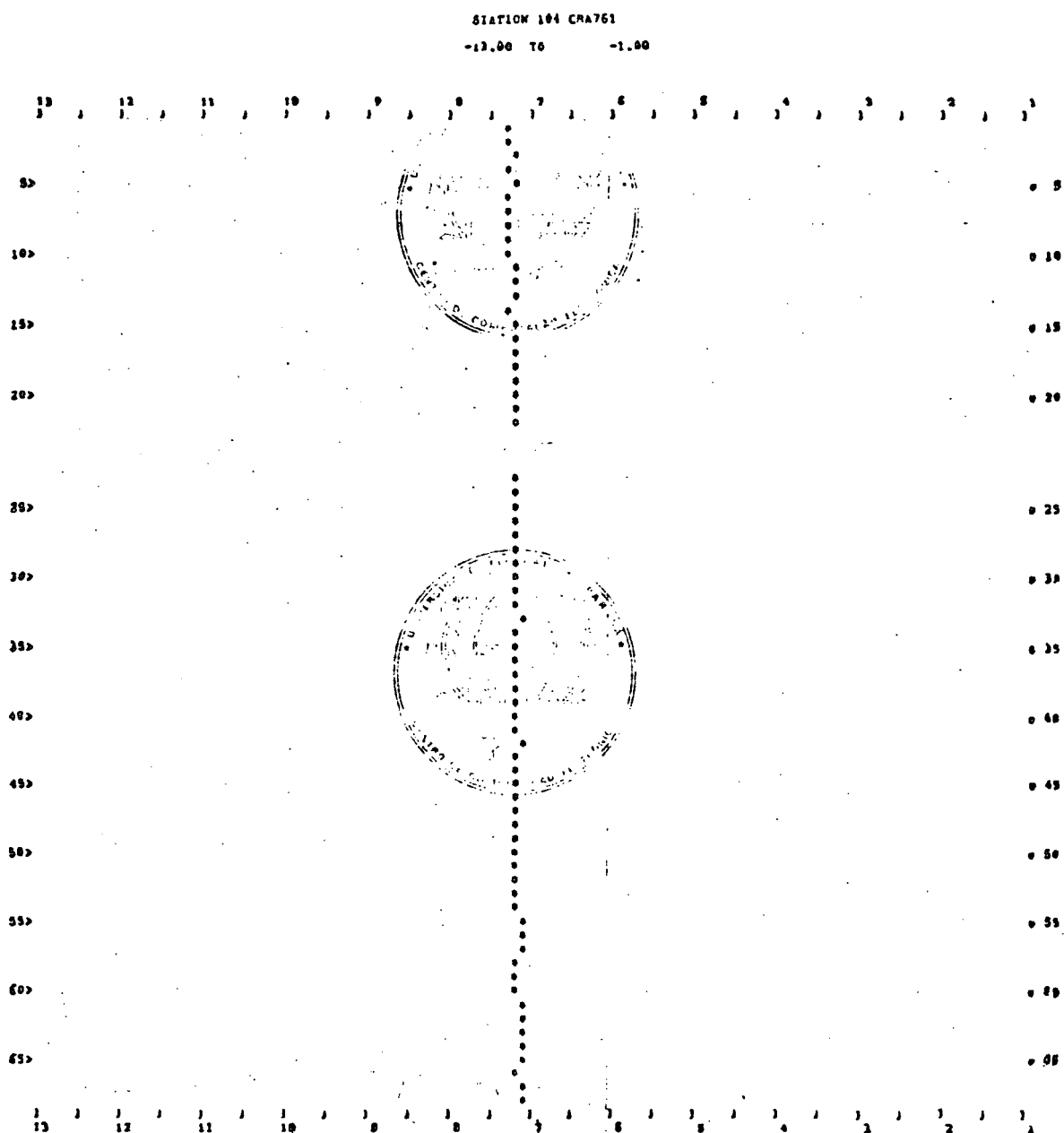




FIGURA 13c

Desvio de frequência receptor C3, CMA-751 S/N 106

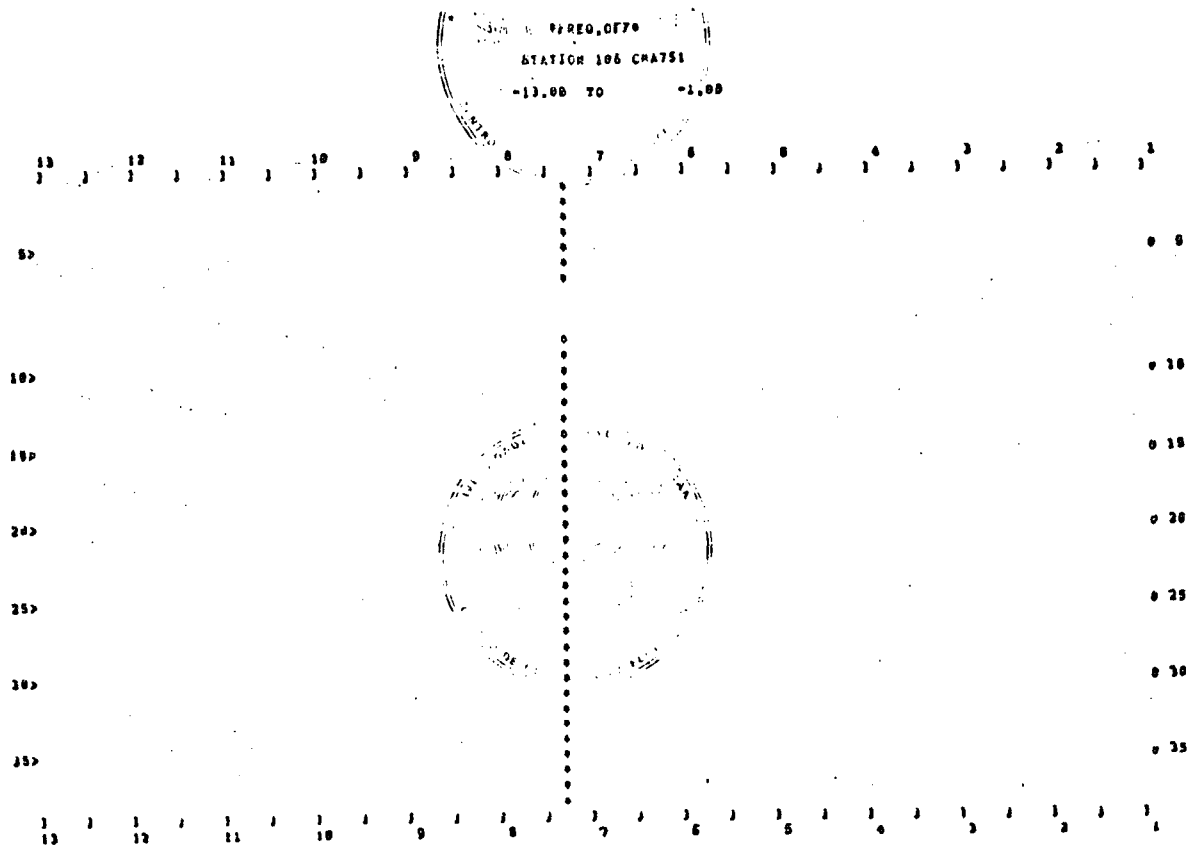


FIGURA 13d

Desvio de frequência receptor C4, CMA-751 S/N 322

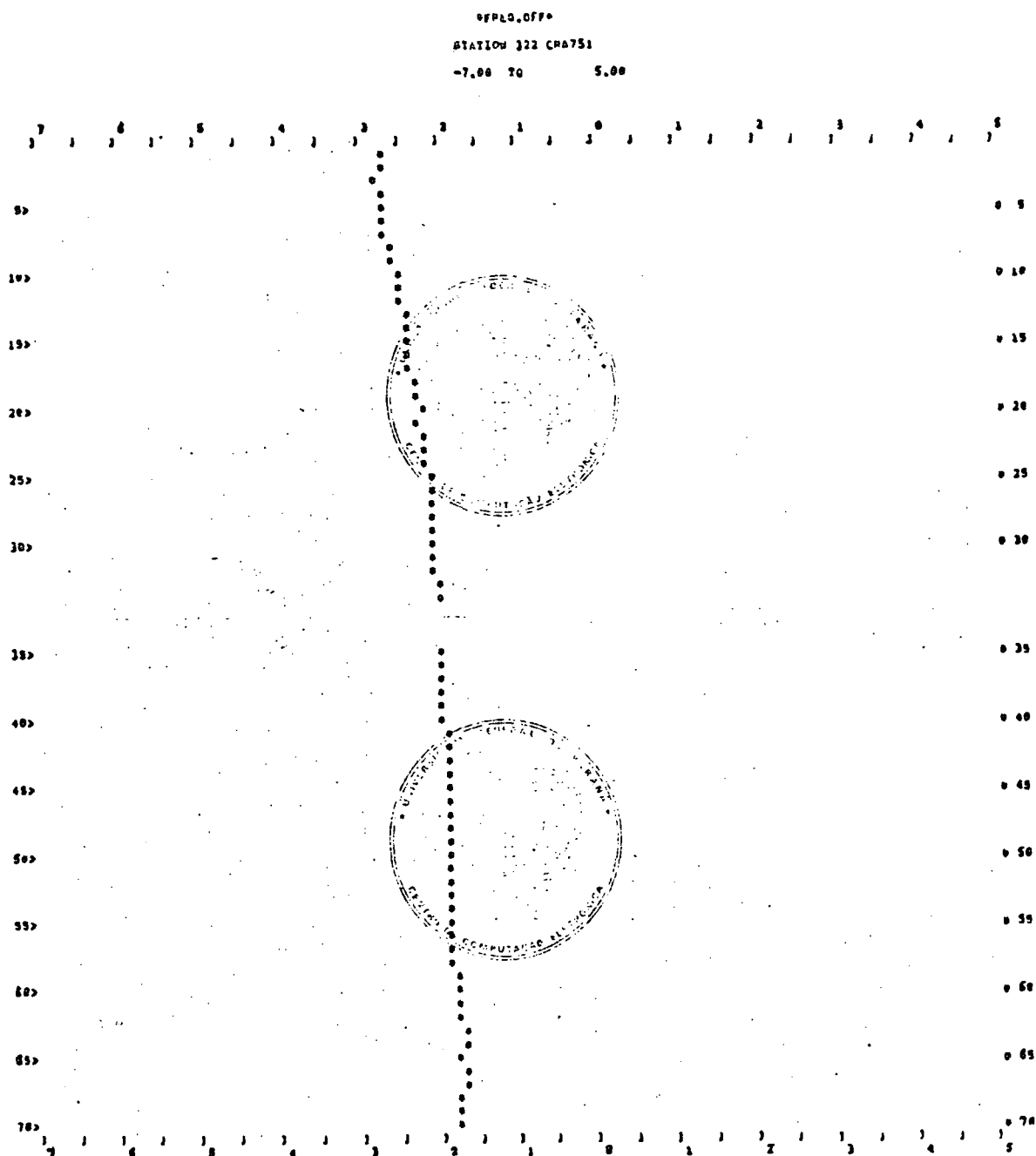


FIGURA 13e Desvio de frequência receptor J1, JMR-1 S/N 1213

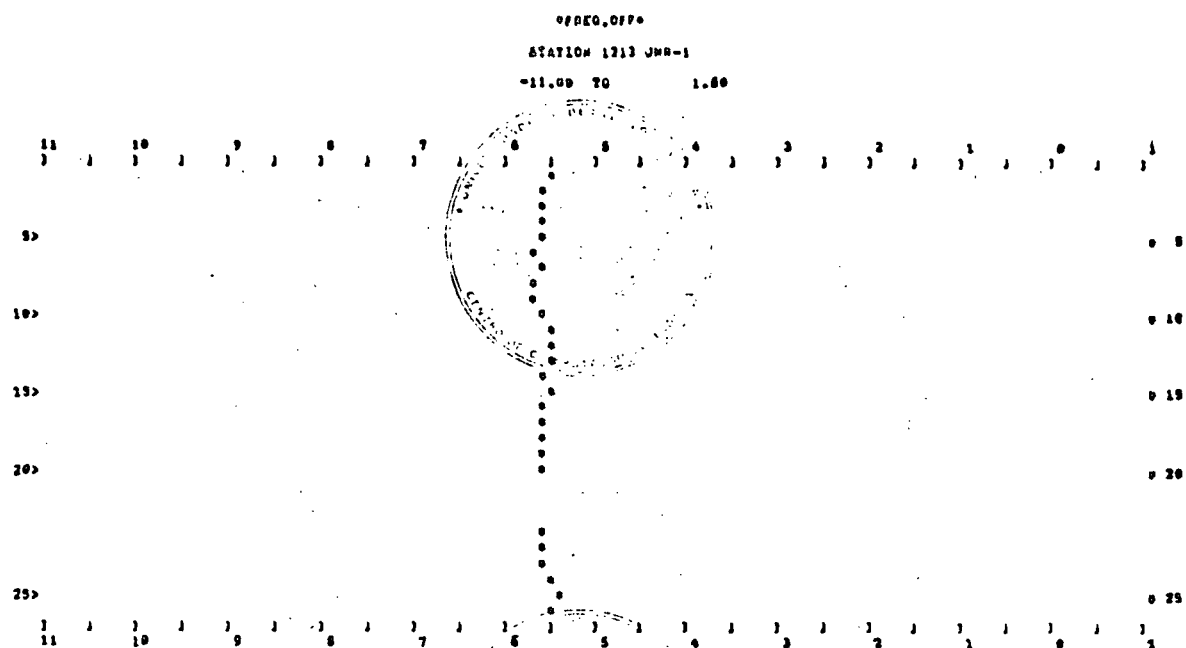


FIGURA 13f Desvio de frequência receptor J2, JMR-1 S/N 1215

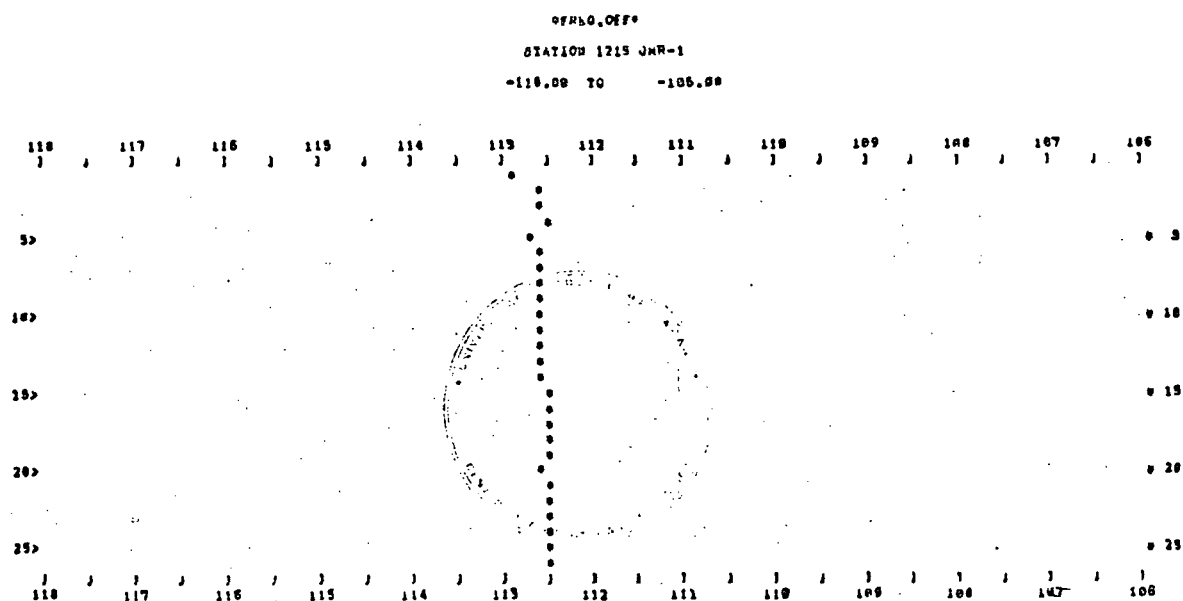
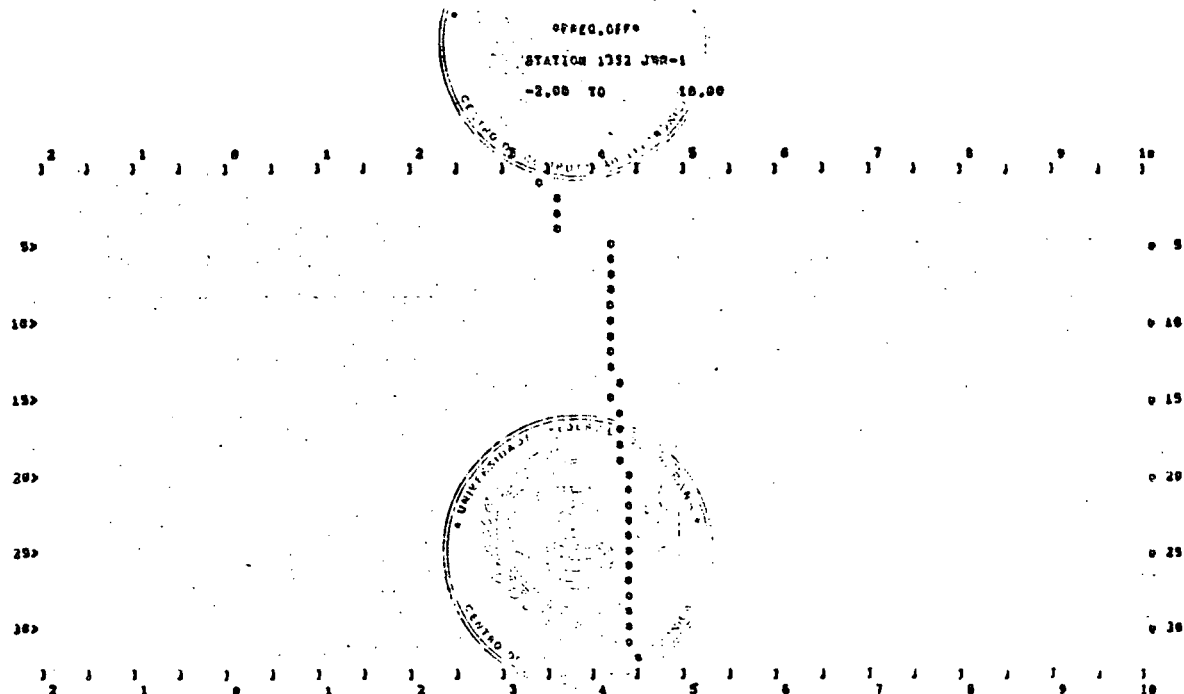


FIGURA 13g Desvio de frequência receptor J3, JMR-1 S/N 1352



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 ABIB, O.A. Geodésia geométrica e por satélites. Rio de Janeiro, s.ed., 1981. 160 p.
- 02 ARCHINAL, B.A. A comparison of geodetic Doppler satellite receivers. Columbus, Dept. of Geodetic Science, The Ohio State University, 1982. 107 p.
- 03 BLAHA, F. Features and capabilities of the new generation CMA-751 satellite Doppler field survey system. In: INTERNATIONAL GEODETIC SYMPOSIUM ON SATELLITE DOPPLER POSITIONING, 2., Austin, TX, 1979. Proceedings. Austin, TX, 1979. p.535-56.
- 04 BOAL, J.D. Satellite Doppler surveying. In: CANADÁ, Departament of Energy, Mines and Resources. Surveys and Mapping Branch. Collected Papers, Geodetic Survey. Ottawa, Surveys and Mapping Branch, 1980. p.15-48.
- 05 CAMPOS, M.A. Controle da rede geodésica brasileira por meio de satélites do sistema NNSS. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, s.ed. 10 f. Mimeografado. Trabalho apresentado ao XII Congresso Brasileiro de Cartografia. Brasília, 1986 (não publicado).

- 06 COLQUITT, E.S. Effect of oscillator performance on Doppler geodesy. In: INTERNATIONAL GEODETIC SYMPOSIUM ON SATELLITE DOPPLER POSITIONING, 2., Austin, TX, 1979. Proceedings. Austin, TX, 1979. p.409-22.
- 07 EISNER, A. et alii. Nova-1 the newest Transit satellite (A status report). In: INTERNATIONAL GEODETIC SYMPOSIUM ON SATELLITE DOPPLER POSITIONING, 1., Austin, TX, 1979. Proceedings. Austin, TX, 1979. p.55-61.
- 08 GEMAEL, C. Introdução à geodésia celeste, 1ª parte: órbitas e rastreo. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1975. p.irr.
- 09 GONZALES, A. Características singulares del JMR-1 y los nuevos equipos de la JMR Instruments Inc. Revista Cartográfica IPGH, (31): 99-116, 1977.
- 10 HARRIS, H.C. Some results of Doppler receiver testing. In: AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING, 38. Annual Meeting, Washington, 1978. Proceedings. Falls Church, 1978. p. 252-78.
- 11 HOAR, G.J. Topografía por satélite. s.l., Magnavox, 1983. p.irr.
- 12 ICENBICE, D. Major improvements in satellite receiver time recovery for (cm) accuracy. In: INTERNATIONAL GEODETIC SYMPOSIUM ON SATELLITE DOPPLER POSITIONING, 2. Austin, TX, 1979. Proceedings. Austin, TX, 1979. p.557-73.

- 13 KOUBA, J. Doppler leveling. Canadian Surveying. (30)1: 21-33, 1976.
- 14 KOUBA, J. GEODOPV Geodetic Doppler positioning programs (version V). Report of Gravity, Geothermics & Geodynamics Division, Earth Physics Branch, Dept. of Energy Mines and Resources, Ottawa. 1983. 69 p.
- 15 KOUBA, J. A review of geodetic and geodynamic satellite Doppler positioning. Rev. Geophys.Space-Phys., 21(1): 27-40, 1983.
- 16 KOUBA, J. Users guide. The GEODOPV program system. Ottawa, Dept. of Energy, Mines and Resources, 1982. 34 p.+ appendix.
- 17 KOUBA, J. & BOAL, J.D. Program GEODOP. Ottawa, Surveys and Mapping Branch, 1976. p. irr.
- 18 LAWNIKANIS, P. Program PREDOP. Ottawa, Surveys and Mapping Branch, 1976. 80 p. + Appendix.
- 19 MORGAN, P. Simulation studies for crustal motion monitoring by Doppler in Papua New Guinea. Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying. (35): 15-62, 1981.
- 20 SCHENKE, H.W. Untersuchungen zur Genauigkeit von Doppler-Satellitenbeobachtungen. Wiss. Arb. Fachr. Vermess. Univ. Hannover - (129), 1984. 205 p.
- 21 SCHLUTER, W. Satellite Doppler point positioning using the Navy Navigation Satellite System. Manuscript prepared for a series of lectures held at Wuhan College of Geodesy, Cartography and Photogrammetry, 1981. 67p.

- 22 SIEBOLD, J.; SCHENKE, H.W.; EGGE, D. GEODOPV portable version Fortran 77. Institute of Geodesy, University of Hannover, 1983. 20 p.
- 23 WELLS, D.E. Doppler satellite control. Fredericton, Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, 1976. 227 p. Technical Report, 29.